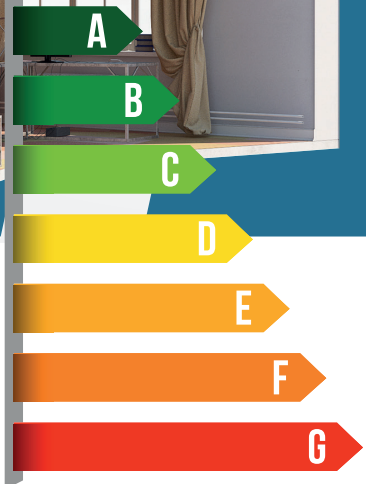
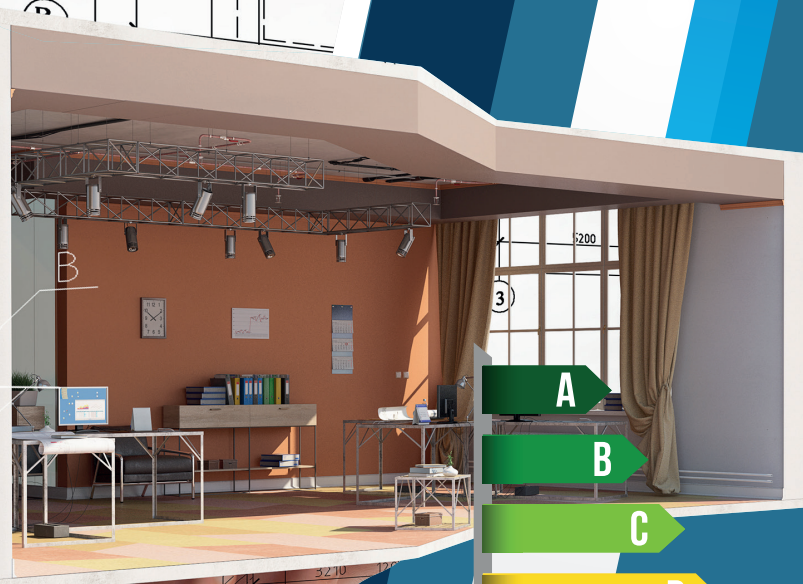




ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA ESTÁNDARES CONSTRUCTIVOS

MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA ESTÁNDARES CONSTRUCTIVOS

Autor:

Ministerio de Hidrocarburos y Energías (MHE)
Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas (VMEEA)
Niras – IP Consult para el Programa de Energías Renovables (PEERR II)

Edición, diseño y diagramación:

Comunicación Programa de Energías Renovables (PEERR)

Esta publicación es apoyada por la Cooperación Alemana al Desarrollo, a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su Programa de Energías Renovables (PEERR II).

Se autoriza la reproducción total o parcial del presente documento, sin fines comerciales, citando adecuadamente la fuente.

La Paz, Bolivia, octubre 2022

MANUAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA ESTÁNDARES CONSTRUCTIVOS



Índice

PARTE 1: CONTEXTO CLIMÁTICO Y ENERGÉTICO	1
1.Introducción	2
1.1 Las edificaciones residenciales y el consumo energético mundial	2
1.2 Los acuerdos internacionales y el compromiso boliviano	3
1.3 El consumo residencial y el enfoque de sustentabilidad	4
1.4 Potencial de EE en el sector vivienda	5
PARTE 2: CONCEPTOS BÁSICOS DE LA EE APLICADA AL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS	7
2. Variables climáticas exteriores	8
2.1 Radiación solar	9
2.2 Temperatura del aire	15
2.3 Humedad relativa	15
2.4 Viento	15
3. Confort térmico	16
3.1 Termorregulación humana	17
3.2 Variables que definen el confort	18
4. Definición geográfica y climatológica de Bolivia	26
5. La vivienda como un sistema energético	32
5.1 Envolverte térmica	32
5.2 La transferencia de calor	33
5.3 Los sistemas mecánicos y eléctricos en el interior de la vivienda	42
5.4 Los habitantes de la vivienda	42
5.5 Balance térmico	42

6. Estrategias de diseño pasivo44

6.1 Oferta y aprovechamiento de radiación solar45

6.2 Sistemas de aislamiento térmico en la envolvente54

7. Renovación de aire, ventilación y control de filtraciones58

7.1 Requerimientos de ventilación y renovación de aire59

7.2 Definiciones preliminares60

7.3 Necesidad de cambio de aire60

7.4 Estrategias de ventilación y control61

PARTE3: ESTRATEGIAS RECOMENDADAS PARA UNA VIVIENDA SOCIAL EFICIENTE EN BOLIVIA71

8. Tipologías típicas de construcción de viviendas sociales en Bolivia72

8.1 Zona 1: Tierras Bajas73

8.2 Zona 2: Tierras de Valles73

Zona 3: Tierras Altas73

9. Recomendaciones generales para mejora de la eficiencia energética en viviendas sociales de Bolivia74

9.1 Zona climática I: tierras bajas74

9.2 Zona climática II: tierras de valles75

9.3 Zona climática III: tierras altas75

BIBLIOGRAFÍA76

Índice de tablas

Tabla 1. Cartas solares en sitios representativos por zona biogeográfica.12

Tabla 2. Índice de metabolismo promedio para un ser humano en distintas actividades.20

Tabla 3. Resistencia térmica de distintos tipos de vestimenta.20

Tabla 4. Zonas biogeográficas en Bolivia31

Tabla 5. Valores de Factor Solar (FS) para aberturas con superficies transparentes35

Tabla 6. Valores de Factor Solar (FS) para aberturas con protección solar36

Tabla 7. Absorbancia (a) y emisividad (e) de materiales y colores36

Tabla 9. Resistencia térmica superficial39

Tabla 10. Resistencia térmica superficial40

Tabla 11. Sistemas constructivos de piso según tipo de clima56

Tabla 12. Principales propiedades de materiales aislantes57

Tabla 13. Requerimientos de aire de ventilación60

Tabla 14. Ventilación mínima necesaria en ambientes (Rivero, 1985)61



Índice de figuras

Figura 1. Movimiento de la tierra en la eclíptica	9
Figura 2. Variación de la declinación solar (δ)	10
Figura 3. Altitud solar y azimut solar	10
Figura 4. Movimiento aparente del sol en el cielo respecto a una superficie horizontal del Hemisferio Sur	11
Figura 5. Diagrama bioclimático de Olgyay.	21
Figura 6. Diagrama de confort según B. Givoni (modificado)	22
Figura 7. Diagramas de Givoni para sitios representativos de Bolivia	23
Figura 8. Orografía	27
Figura 9. Sierras Subandinas	28
Figura 10. Zonas Biogeográficas en Bolivia	29
Figura 11. Regiones latitudinales en Bolivia	30
Figura 12. Zonas Biogeográficas en Bolivia	30
Figura 13. Absorción, transmisión y reflexión de la radiación sobre una superficie	34
Figura 14. Factor Solar (FS) en un elemento transparente	35
Figura 15. Mecanismos de transferencia de calor en un recinto	43
Figura 16. Radiación total diaria sobre una superficie colectora	46
Figura 17. Diagrama de recomendación de orientación	47
Figura 18. El efecto invernadero capta y atrapa la radiación solar durante el día	49
Figura 19. Longitud de onda de radiación solar y emisión de cuerpos calentados	49
Figura 20. Uso de tragaluces para incrementar el efecto invernadero	50
Figura 21. Alero fijo en orientación Norte	52
Figura 22. Protecciones solares verticales para orientación Este y Oeste	52
Figura 23. Protección solar fija en ventanas para diferentes orientaciones.	53
Figura 24. Fotografías de corredores cubiertos	53
Figura 25. Flujo del viento alrededor de las edificaciones	61
Figura 26. Tipos de ventilación natural	62
Figura 27. Esquemas de ventilación de entretecho	63
Figura 28. Ventilación cruzada	64
Figura 29. Ventilación cruzada - ambientes con variadas configuraciones	64
Figura 30. Mecanismo de ventilación nocturna	65
Figura 31. Acción del viento sobre la edificación	66
Figura 32. Flujo de aire y presiones sobre la edificación.	67
Figura 33. Esquemas del efecto chimenea en la edificación.	68



PARTE

Contexto climático
y energético

1

Introducción

1.1 Las edificaciones residenciales y el consumo energético mundial

Según el informe de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, por sus siglas en inglés), las edificaciones consumirán en 2025 casi el 30 % de la demanda de energía final en todo el mundo: se trata de una demanda de energía mundial equivalente a la demanda del sector industrial y del transporte.

La mayor parte de esta demanda es eléctrica, lo que hace que las edificaciones consuman una buena parte de la electricidad que se usa en el mundo. El informe menciona que las edificaciones residenciales consumen casi tres veces más energía que las no residenciales (IEA. Energy Technology Perspectives, 2017).

Si bien los usos finales varían por tipo de edificación, se encontró que la calefacción de los ambientes, la cocción de alimentos y el calentamiento de agua, representan la mayor parte del consumo energético residencial.

En el mismo informe se encuentra que, en América Latina, las edificaciones residenciales son responsables de una importante parte del uso final energético. En ellas, el uso predominante está destinado al calentamiento del agua y a la cocción de alimentos. Se menciona también que en la región latinoamericana la refrigeración

de ambientes representa una proporción mucho mayor que el promedio mundial y el uso final de la energía para calefacción es menos significativo. Se proyecta que la climatización de las edificaciones aumentará el uso energético total por encima del 40 % en los próximos 20 años.

El uso final energético del sector residencial boliviano, sin embargo, pareciera seguir una tendencia cuya naturaleza es diferente a la región y el promedio mundial.

Según el Balance Energético Nacional (BEN), hacia el año 2018 el consumo energético del sector residencial boliviano había alcanzado al orden de 6.700 kbep (miles de barriles equivalentes de petróleo), tuvo un crecimiento de 3,8%/año en el período 2000 - 2018 y representaba sólo el 14,3% del consumo total, después del consumo de los sectores del transporte y la industria.

1.2 Los acuerdos internacionales y el compromiso boliviano

El objetivo del Acuerdo Climático de París es limitar el calentamiento global promedio a menos de 2°C por encima de los niveles preindustriales y continuar los esfuerzos para limitar el aumento de temperatura a 1,5 °C mediante la reducción de emisiones. Si bien este objetivo se formula a nivel mundial, el éxito del acuerdo depende fundamentalmente de la implementación de políticas climáticas a nivel nacional, materializado por el requisito de los países de presentar

Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés). El Acuerdo de París prevé revisiones de las NDC cada cinco años, lo que permite a los países alcanzar sus compromisos actuales y ampliar sus ambiciones y objetivos de mitigación.

En este marco, Bolivia firmó el Acuerdo de París en abril de 2016 y lo ratificó en octubre del mismo año, convirtiendo sus Intenciones de

Contribuciones Nacionalmente Determinadas (INDC, por sus siglas en inglés) en Compromisos Nacionalmente Determinadas.

Los NDC de Bolivia no establecen metas sectoriales de emisiones de GEI, debido a que se enfoca en desarrollar cambios estructurales hacia un desarrollo integral bajo en emisiones y residente al clima. Sin embargo, se establecen metas sectoriales como, por ejemplo, triplicar la capacidad de almacenamiento de agua,

1.3 El consumo residencial y el enfoque de sustentabilidad

El enfoque de sustentabilidad energética - en su dimensión social- establece la responsabilidad de las naciones y sus gobiernos de satisfacer las necesidades energéticas esenciales de su población.

El uso final de energía del sector residencial es parte inseparable del análisis de la sustentabilidad de la matriz energética, a través de la cobertura de necesidades básicas (CNB) medido -por el momento- como el consumo residencial de energía per cápita ¹.

Los estudios de medición de la sustentabilidad energética en la región, en el periodo 2000-

incrementar la participación de energías renovables en la generación de electricidad hasta un valor equivalente al 79%.

En este marco, la Actualización de las CND para el periodo 2021-2030 presenta varias líneas de trabajo relacionadas con el desarrollo del sector eléctrico, la reducción de emisiones en el sector, la aplicación de medidas de eficiencia energética, entre otras. (MMAYA - APMT. Diciembre de 2021)

2018, muestran que la cobertura de necesidades básicas, medida en unidades de energía neta, no dejó de crecer en la región sudamericana. Superando un promedio de crecimiento anual del 1,08%. Aunque su magnitud continúa siendo muy baja considerando el contexto mundial, es importante destacar que el crecimiento en consumo de energía neta per cápita ha sido mayor al crecimiento poblacional. La evolución del CNB muestra que el sector residencial boliviano, al 2018, tenía un consumo per-cápita de 0,31 bep/hab-año, experimentó un crecimiento de 52,7% en el período 2000 - 2018 y es el segundo más bajo consumo de la región sudamericana.



¹ El indicador se mide en unidades de energía neta per-cápita debido a que el país no cuenta aún con un balance de energía útil.

1.4 Potencial de EE en el sector vivienda

Los estudios de potencial de eficiencia energética en la vivienda social de Bolivia mostraban, a través de simulaciones del balance energético de las viviendas, que las necesidades energéticas de calefacción y refrigeración para mantener los ambientes de la vivienda en la situación de confort en la actualidad son importantes y supondrían, en condiciones de suficiencia energética, elevados consumos energéticos para mantener las viviendas en situación de confort.

Estas necesidades energéticas no se ven reflejadas en la magnitud del indicador mencionado líneas arriba y, más bien, sugieren una persistente situación de pobreza energética² en segmentos de población que no pueden cubrir los costos energéticos de climatización de las viviendas y resignan el confort térmico y su calidad de vida.

Esta situación constituye, conceptualmente, un grado de insuficiencia energética (déficit energético en las zonas frías y superávit en las zonas cálidas) relacionado directamente con el diseño y construcción de la edificación.

En este marco, el presente documento tiene el propósito de ayudar a los diseñadores de la vivienda social en Bolivia, a lograr edificaciones energéticamente suficientes, que permitan alcanzar niveles de confort deseables con el menor consumo y costo energético posible.

² El debate dominante en torno a la energía y el bienestar está concentrado en el confort térmico y la generación de calor para calefacción de ambientes como un servicio esencial, debido a los efectos en la salud y la vida que traía el invierno en las familias pobres, cuyas viviendas –energéticamente insuficientes– demandan cantidades importantes de calor para alcanzar el confort térmico, hecho que afecta seriamente el presupuesto familiar. Day, Rosie; Walker, Gordon; Simcock, Neil (2016). “Conceptualising energy use and energy poverty using a capabilities framework”. Energy Policy, 93, 255-264





2 PARTE

**Conceptos
básicos de la EE
aplicada al diseño
y construcción de
viviendas**

2

Variables climáticas exteriores

El clima, en general, es una función de la actividad solar y de la latitud del sitio en el que se encontrará emplazada la vivienda que se va a diseñar. Se describe a través de las variables climáticas que son medidas y registradas en las estaciones meteorológicas.

Las variables climáticas expresan las características de una zona biogeográfica. Ya en la antigüedad, el planeta había sido dividido en tres principales zonas biogeográficas: tropical, templada y fría (ártica). El conocimiento de las variables climáticas predominantes en una zona biogeográfica es fundamental para el diseño de una edificación.

Entre las principales variables climáticas, figuran: la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y el viento.

2.1 Radiación solar

La radiación solar es la principal fuente de energía del planeta, ya sea como fuente de calor o como fuente de luz. Su estudio es muy importante para el diseño de edificaciones energéticamente eficientes.

La magnitud de radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra depende de varios factores, entre ellos el movimiento de la Tierra alrededor del Sol –movimiento conocido como cinética terrestre–, la inclinación del eje polar de la Tierra respecto al Sol a lo largo del año, y los ángulos de incidencia sobre un plano horizontal a nivel del planeta como producto de esta inclinación. En las siguientes secciones estudiaremos cada uno de estos factores.

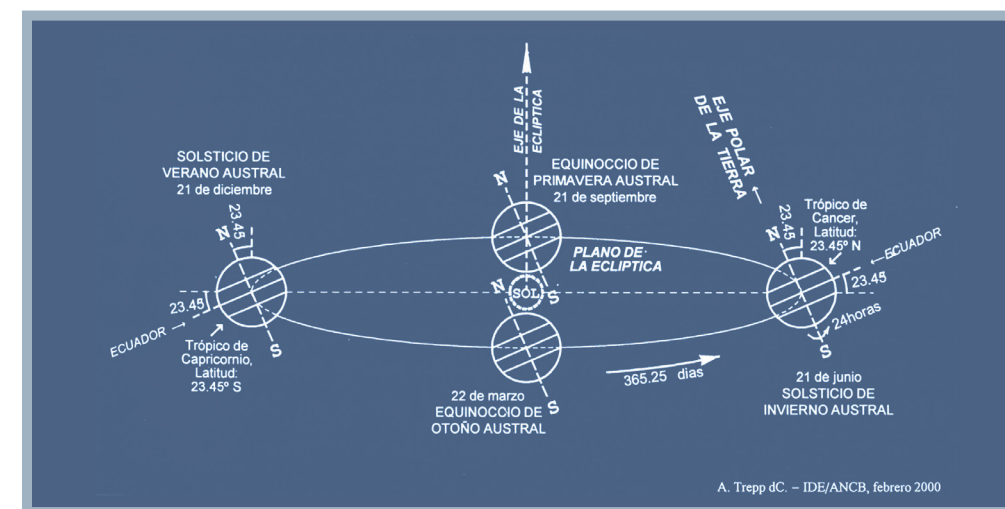
2.1.1 Cinética terrestre

La Tierra se mueve alrededor del Sol sobre una órbita elíptica que traza un plano denominado *plano de la eclíptica*³. Una revolución completa del planeta demanda un lapso de 365,25 días: un año (Trepp, Andrés, 2006: 3).

El planeta, además, gira sobre su propio eje –denominado eje polar– completando una revolución en un día o 24 horas, y definiendo el movimiento diario del Sol en el cielo (visto desde la Tierra).

El eje polar tiene una inclinación fija de 23,45° respecto al eje del plano de la eclíptica y su posición respecto al Sol determina la trayectoria solar estacional (Figura 1).

Figura 1. Movimiento de la tierra en la eclíptica



Fuente: Ángulos y trayectorias solares en el territorio de Bolivia. A. Trepp 2006

³ El Diccionario de la Real Academia Española (RAE) define Eclíptica como el “Círculo formado por la intersección del plano de la órbita terrestre con la esfera celeste, y que aparentemente recorre el Sol durante el año”.

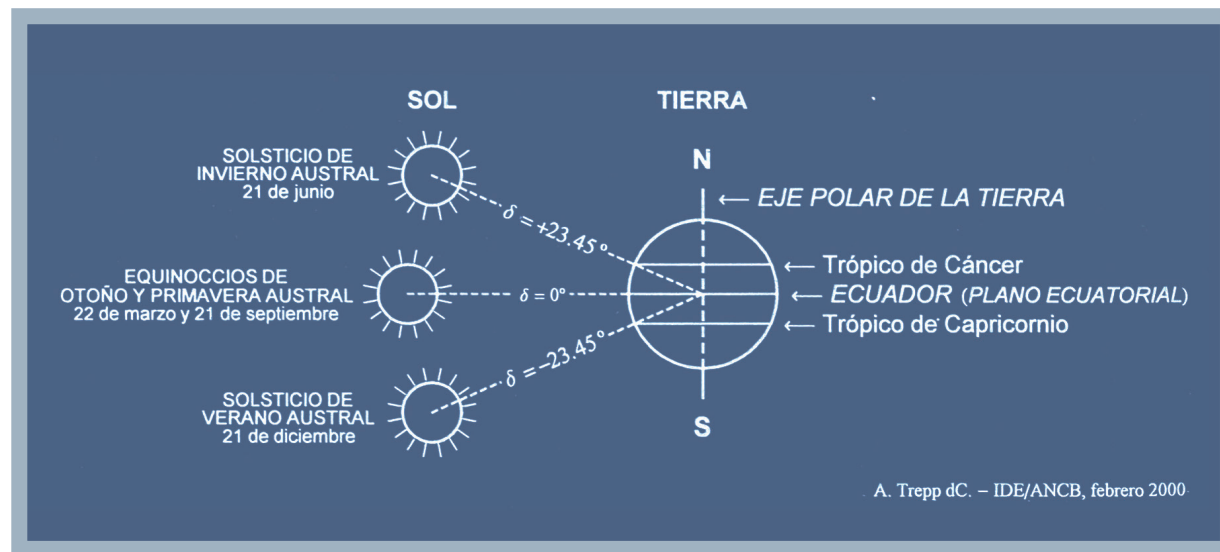
2.1.2 Declinación solar

El ángulo entre el eje polar de la Tierra y la normal a la eclíptica ⁴ constante. También lo es el ángulo formado por el plano ecuatorial de la Tierra y el plano de la eclíptica (Trepp, A., 2006: 5).

En cambio, el ángulo formado por la línea que une los centros del Sol y la Tierra con el plano

ecuatorial de la Tierra varía en cada instante a lo largo del año. Este ángulo se denomina declinación solar (δ), tiene un valor máximo de $23,45^\circ$ en el solsticio de invierno austral, y un valor mínimo de $-23,45^\circ$ en el solsticio de verano austral (Figura 2).

Figura 2. Variación de la declinación solar (δ)

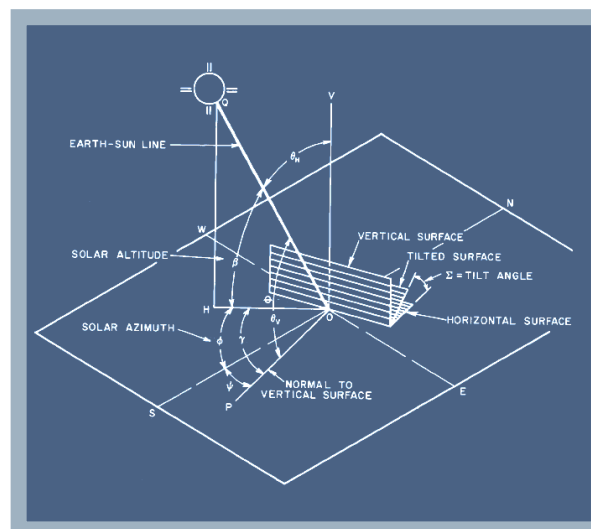


Fuente: Ángulos y trayectorias solares en el territorio de Bolivia. A. Trepp 2006

2.1.3 Altura solar y Azimut solar

Supongamos un observador ubicado en el punto O, al pie de una superficie que se encuentra al nivel de la Tierra. La superficie está inclinada un ángulo Σ respecto al plano horizontal: 0° cuando es horizontal y 90° si la superficie es vertical. Tiene una determinada orientación respecto al Norte, medida por el ángulo (ψ) formado por línea normal a la superficie (P) y la línea N-S magnética. Esta superficie podría ser cualquier elemento de la envolvente térmica de una edificación. un ángulo respecto

Figura 3 Altitud solar y azimut solar



Fuente: ASHRAE Fundamentals. 2013.

⁴ La normal de la eclíptica es una línea perpendicular a la eclíptica.

Desde este punto (O) la posición del Sol en la esfera celeste se define a partir de dos ángulos: la Altura Solar (β) y el Azimut Solar (\varnothing). Ambos ángulos varían con la hora del día y el día del año.

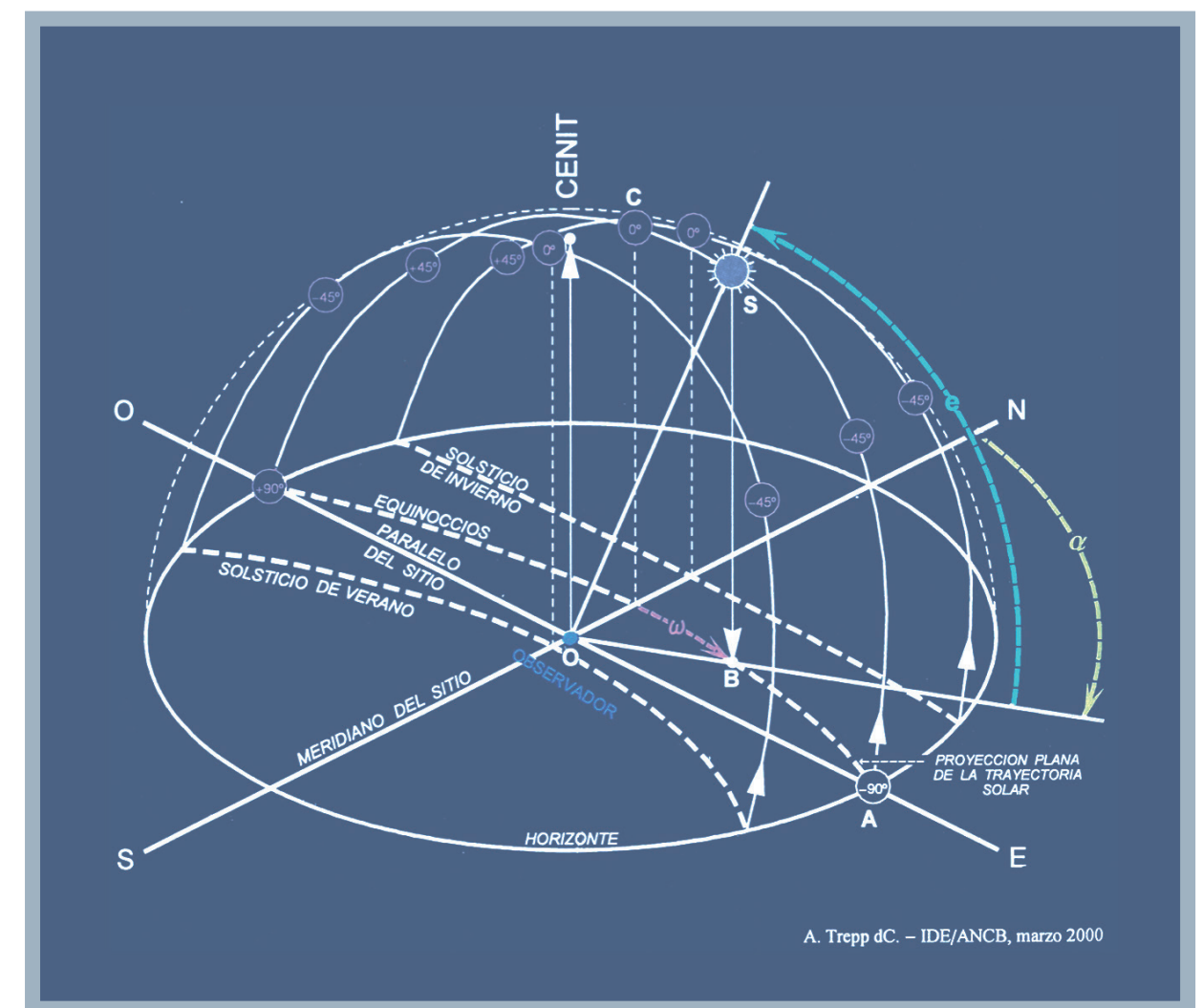
La Figura a continuación muestra los ángulos mencionados y cómo éstos inciden sobre la superficie ubicada al nivel de la Tierra.

1.1.4 Trayectorias solares

El registro de la Altura Solar y el Azimut Solar sobre un diagrama denominado Carta Solar, permite saber la posición del sol en un momento del año y para una localidad de latitud dadas.

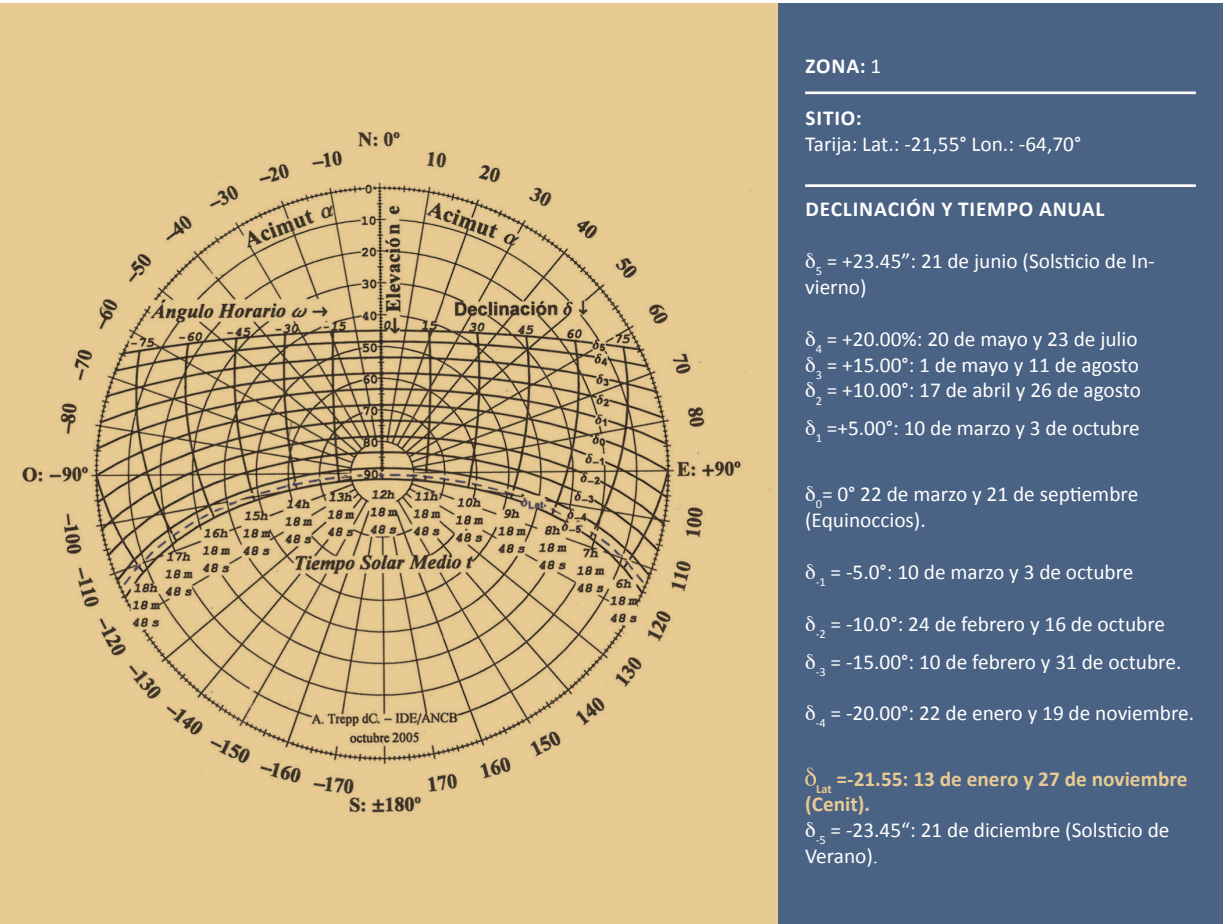
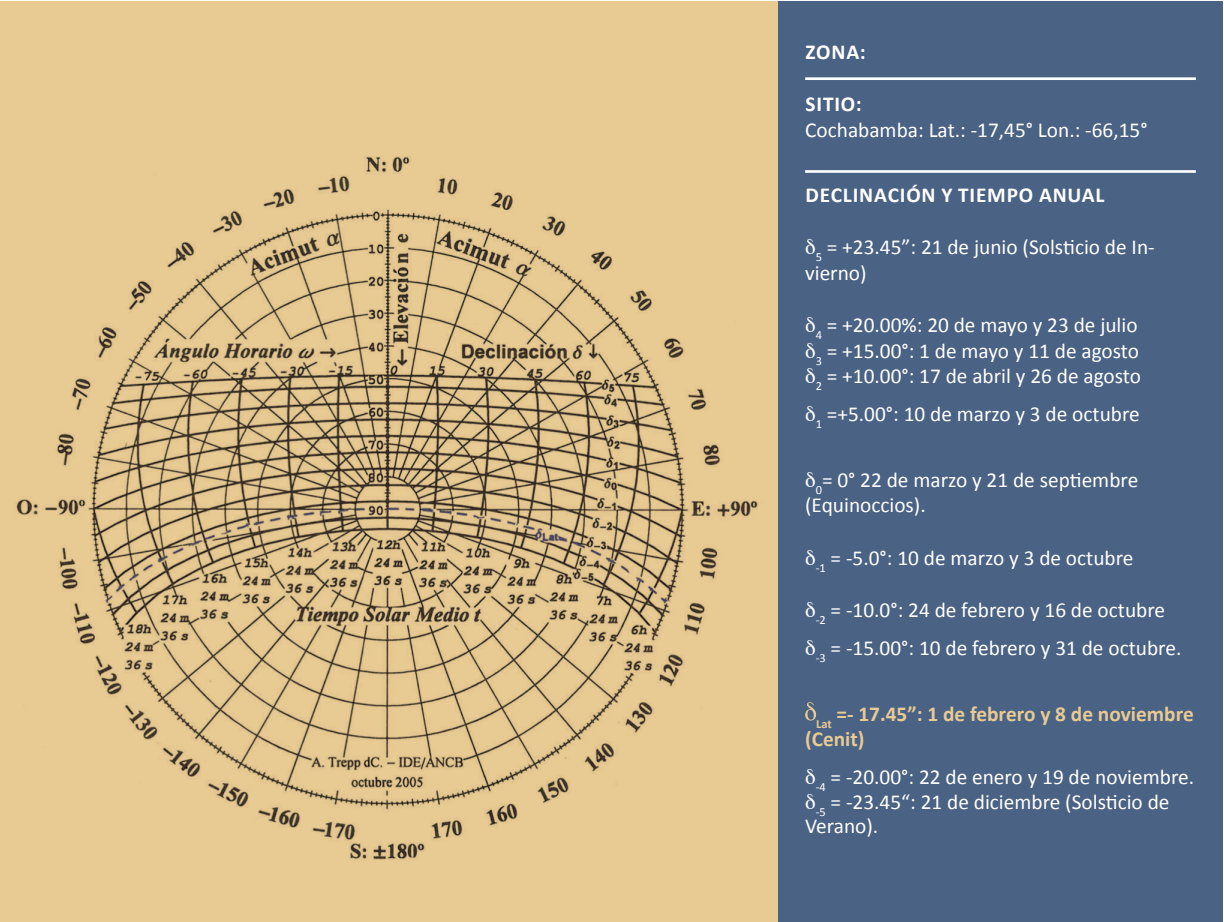
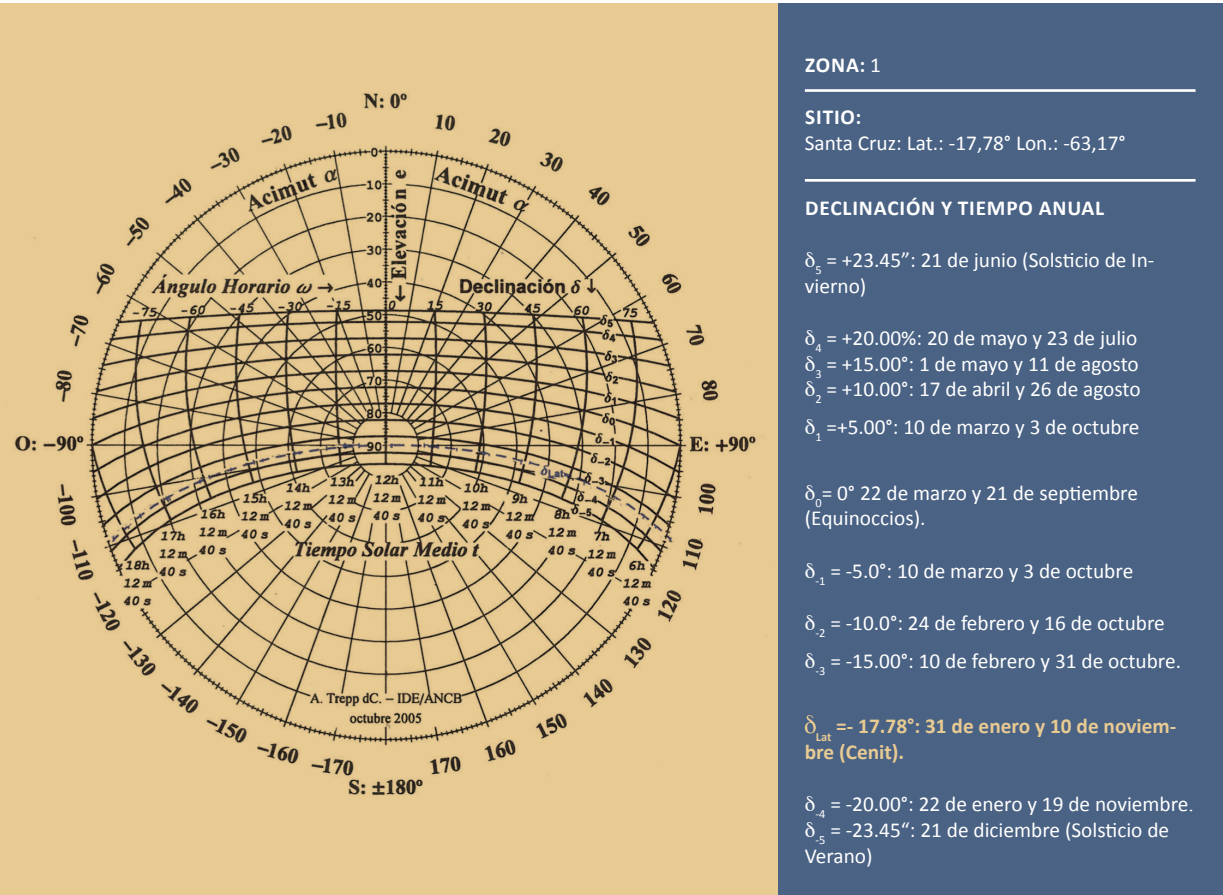
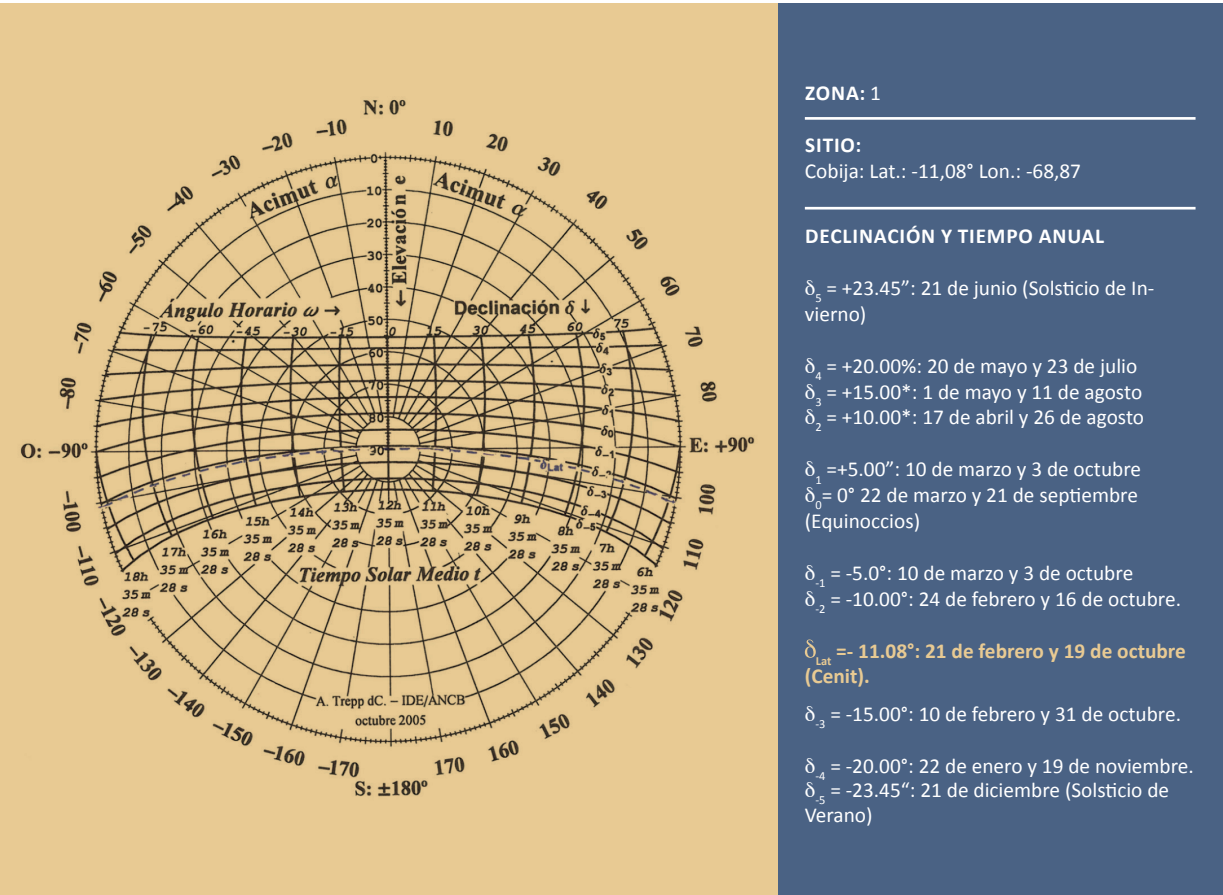
Dado que a cada punto de longitud y latitud geográficas le corresponde una carta solar, se muestran a continuación las cartas solares para lugares representativos de seis zonas biogeográficas de Bolivia, cuya definición se abordará en las secciones siguientes.

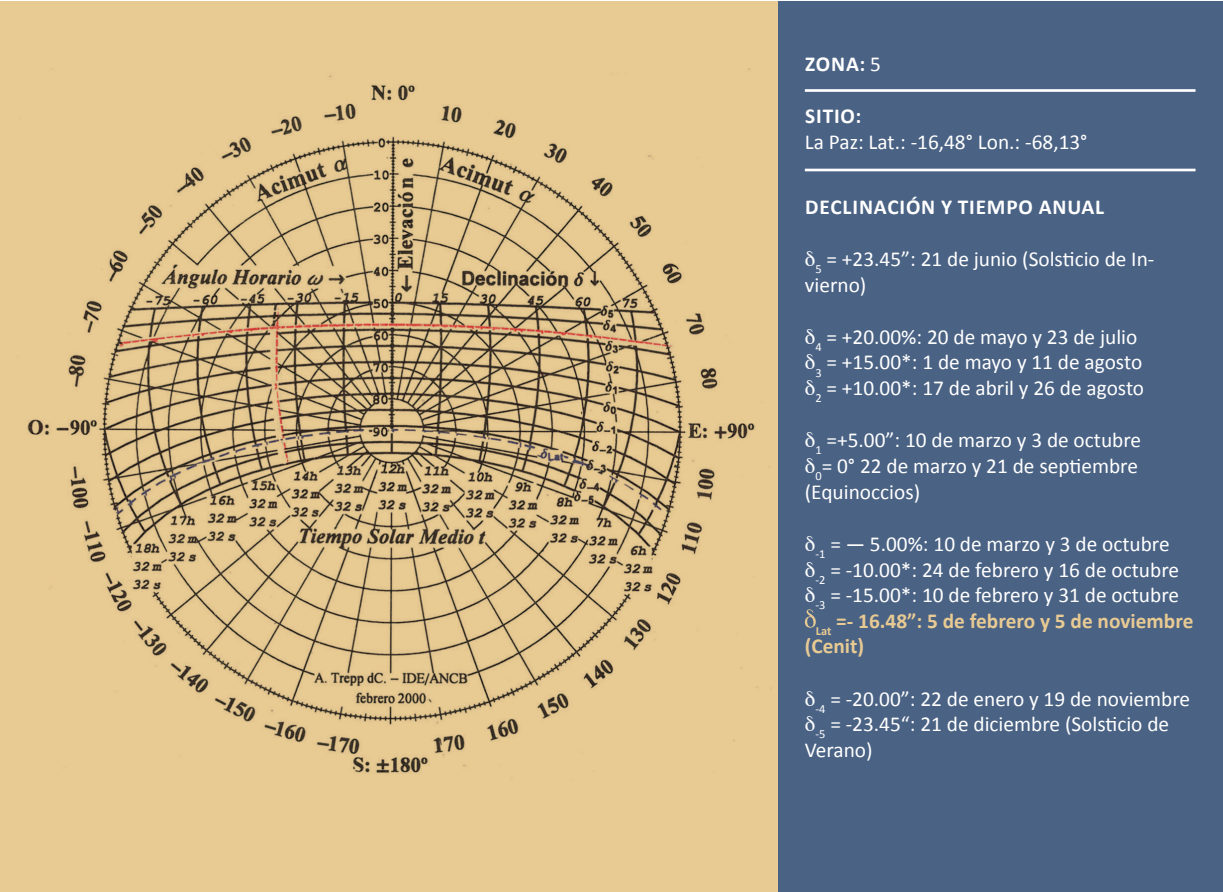
Figura 4. Movimiento aparente del sol en el cielo respecto a una superficie horizontal del Hemisferio Sur



Fuente: Ángulos y trayectorias solares en el territorio de Bolivia. A. Trepp 2006

Tabla 1. Cartas solares en sitios representativos por zona biogeográfica.





2.2 Temperatura del aire

La temperatura es la referencia, en magnitud, de la cantidad de calor que posee un cuerpo o sustancia. Es la variable climática más conocida y de más fácil medición. En cualquier punto del globo, la temperatura es el resultado de los flujos de las grandes masas de aire y de la exposición de ese punto a la radiación solar.

Cuando nos referimos específicamente a la temperatura en el medio ambiente exterior de la vivienda, con fines de diseño en condiciones extremas, se trata de una magnitud basada en registros de varios años y constituye una variable determinante en el diseño de la vivienda. Según

sea el caso, se trata de la más baja y sostenida temperatura que se espera ocurra en las condiciones de un invierno normal, o la más alta y sostenida temperatura que se espera ocurra en las condiciones de un verano normal.

Dadas las condiciones latitudinales, altitudinales y de temperatura que caracterizan a una zona biogeográfica determinada, la temperatura del aire exterior, en términos de variable de diseño de la vivienda, tendrá un valor específico para cada una de las zonas y para cada uno de los valores estacionales extremos mencionados.

2.3 Humedad relativa

La humedad relativa es la relación entre la cantidad de agua que tiene una masa de aire y la máxima que podría contener esa masa a la misma temperatura.

reducida debido a que el vapor de agua contenido en el aire absorbe la radiación, calienta el aire y refleja parte de la radiación hacia la atmósfera exterior. La masa de aire calentada atenúa las temperaturas extremas y permite condiciones climáticas más estables.

La humedad relativa es la variable climática más estable a lo largo del día. Tiende a aumentar cuando la temperatura del aire baja y a disminuir cuando la temperatura del aire sube. Es el resultado de la evaporación del agua contenida en los mares, lagos y ríos, y de la evapotranspiración de los bosques y vegetales.

Por el contrario, en las zonas áridas y secas, y a la misma altura sobre el nivel del mar, la radiación solar será mayor, los días serán más calientes y las noches serán más frías.

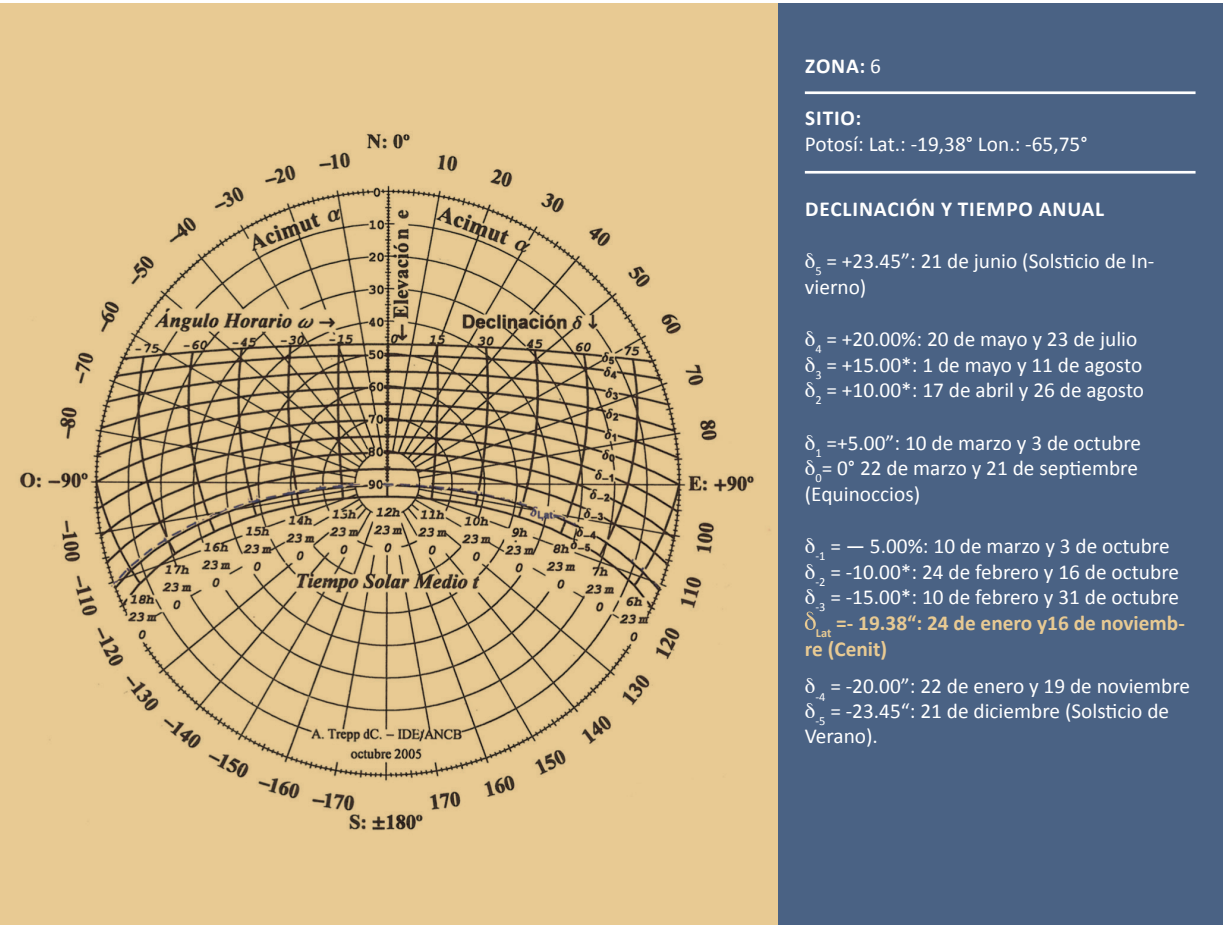
En las zonas biogeográficas con elevada humedad relativa, la transmisión de la radiación solar es

La humedad relativa puede ser modificada en las cercanías a la edificación a través de la presencia de agua o vegetación. Esta modificación abre la posibilidad de refrescar las viviendas.

2.4 Viento

En una determinada región climática existen variaciones en la dirección y velocidad del movimiento del aire (viento) debido a las diferencias de temperatura entre las masas de aire en la atmósfera. Son esas diferencias de temperatura las que provocan el desplazamiento de las masas de aire caliente por encima de las masas de aire frío.

La probabilidad de ocurrencia, magnitud y dirección del viento para las principales orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste) son conocidas a través de diagramas del tipo “rosa de los vientos”. Este tipo de diagramas es útil para proyectar la ventilación de las viviendas.



Fuente: Ángulos y trayectorias solares en el territorio de Bolivia. A. Trepp 2006

3

Confort térmico

El confort térmico es el conjunto de condiciones ambientales que le permiten al ser humano encontrarse en situación de bienestar⁵. En el caso específico del diseño de viviendas, debe entenderse que una vivienda confortable es aquella que hace posible un ambiente en el que las condiciones de humedad, temperatura, iluminación, ruido y ventilación sean las adecuadas, y que, además, estén controladas.

En términos de energía, el confort térmico se expresa como un estado de balance entre el cuerpo humano y el ambiente que lo rodea: se trata de un ambiente en el que

⁵ Bienestar, dice el Diccionario, es el “Conjunto de las cosas necesarias para vivir bien”.

el cuerpo humano no experimenta ganancia ni pérdida de calor.

Para que las variables que definen una situación de confort en el interior de la vivienda no se vean afectadas negativamente por el contexto climático y ambiental exterior, la vivienda debe ser diseñada adecuadamente.

El Standard 55 de la Sociedad Americana de Ingenieros en Refrigeración y Calefacción (ASHRAE, por sus siglas en inglés), especifica como condiciones (o zona de confort) aquellas donde el 80 por ciento de las personas ligeramente activas o en estado sedentario, y con vestimenta similar, encuentran el ambiente térmicamente aceptable.

3.1 Termorregulación humana

La temperatura interna del cuerpo humano tiende a permanecer constante en alrededor de 37°C, independientemente de las condiciones térmicas del aire exterior. La energía necesaria para mantener esa temperatura es generada mediante procesos metabólicos internos del cuerpo que se convierten –casi completamente– en calor.

El equilibrio térmico interior en el cuerpo humano es logrado por el intercambio de calor con el exterior. Éste debe ser disipado o retenido de manera regulada para mantener la temperatura interior del cuerpo.

Para regular el intercambio de calor con el exterior y mantener constante la temperatura interior existen mecanismos, llamados de termorregulación, encargados de reducir o favorecer la transferencia de calor a través de la piel, para evitar una reducción o un incremento de la temperatura interior.

La ausencia de este equilibrio genera la ausencia de confort: la sensación de frío se presenta cuando el cuerpo pierde más energía de la que puede producir para mantener el equilibrio, y la de calor, cuando el cuerpo produce más energía de la que el ambiente puede captar. En una situación extrema, la insuficiente pérdida de calor producirá hipertermia, y la excesiva pérdida de calor producirá hipotermia.

Si el medio ambiente es muy frío, los mecanismos de termorregulación que se activan en el cuerpo humano permiten:

- Reducir las pérdidas de calor por medio de la vasoconstricción periférica que logra una reducción de la temperatura de la piel para equilibrarse con el medio ambiente y reducir la pérdida de calor por radiación y convección;
- Concentrar calor alrededor de los órganos vitales dilatando los vasos sanguíneos que los rodean;

- Incrementar el metabolismo para una mayor producción de calor, con la finalidad de compensar las pérdidas de calor a través de la piel.
- En el caso contrario, si el medio ambiente es muy caliente, existen otros tres mecanismos de termorregulación:
- El primero es la vasodilatación periférica, que incrementa la temperatura de la piel para favorecer las pérdidas de calor por radiación y convección;

- El segundo es la sudoración: este mecanismo es de mayor capacidad pues involucra la evaporación del agua que incrementa la pérdida de calor del cuerpo y funciona óptimamente en presencia de ventilación que acelera la evaporación; y
- El tercero es la reducción del metabolismo, cuyo el propósito es reducir la producción interna de calor.

3.2 Variables que definen el confort

Las variables que determinan la situación de confort de un ambiente son la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura de equilibrio de una superficie, la temperatura radiante, la actividad metabólica, la vestimenta, y la relación entre el confort y la carta psicrométrica.

3.2.1 Temperatura del aire

Se refiere a la temperatura del aire definida en la sección anterior y medida dentro del ambiente en estudio.

3.2.2 Humedad relativa

Se refiere a la definición de humedad descrita en la sección anterior, medida al interior del ambiente en estudio.

3.2.3 Temperatura de equilibrio de una superficie

La capacidad de absorber o reflejar la radiación solar de un material opaco en una edificación está relacionada con propiedades como la absorbanza y la emisividad térmicas.

El conocimiento de estas propiedades permitirá, por ejemplo, seleccionar el color de los muros para favorecer la absorción de la radiación solar en el frío invierno del altiplano; o elegir el color y grado de pulimento de las cubiertas para reflejar la radiación solar durante el verano, en el caso de las tierras bajas.

El balance entre absorbanza y emisividad determina cuánto calor absorberá un material a una temperatura conocida como la temperatura de equilibrio.

Los materiales cuyo color se encuentra en la gama de los negros tienen la más alta temperatura de equilibrio debido a su elevada absorbanza térmica. Estos materiales permiten maximizar la ganancia de calor por radiación solar. Sin embargo, debe anotarse que el negro también tiene una elevada emisividad.

Los materiales en la gama de los blancos tienen las menores temperatura de equilibrio debido a su baja absorbanza térmica. Este tipo de materiales permiten minimizar las ganancias de

calor por radiación solar. Por otra parte, estos colores también tienen elevada emisividad térmica.

Existen otros materiales, como los metales pulidos, cuya absorbanza y emisividad térmicas son muy bajas. Estos materiales pueden ser usados como barreras de radiación solar pues no absorben la radiación (la reflejan) y la emisión del calor almacenado es muy baja. Estos materiales tienen una temperatura de equilibrio mayor al blanco, debido a su baja emisividad.

3.2.4 Temperatura radiante

La temperatura radiante es la temperatura que emite un cuerpo caliente en un medio ambiente más frío.

El efecto radiante sobre una persona próxima a una estufa es alto debido a la temperatura del calefactor. Sin embargo, el efecto radiante puede ser muy bajo o negativo, como es el caso de una persona próxima a una ventana en un día de invierno.

Para determinar si un cierto material o cuerpo sólido y opaco en la edificación será un neto ganador o perdedor de energía radiante, se debe considerar la temperatura y ángulo de exposición de todos los objetos que están en el campo visual del cuerpo en estudio.

Su valor se obtiene a partir de la temperatura del aire (ta), la temperatura de bulbo seco (ts) y la velocidad del aire (Va):

$$t_{mr} = t_a + 0,24(t_a - t_s) V_a^{1/2}$$

3.2.5 Actividad metabólica

La cantidad e intensidad de la actividad física determina la cantidad de energía generada por el metabolismo. Esta energía, destinada al funcionamiento de los órganos vitales, musculatura, movimiento de fluidos, equilibrio de la temperatura, etcétera, tiene varios residuos: el más importante es la cantidad de calor residual que el cuerpo evacúa por los mecanismos de termorregulación mencionados en párrafos anteriores.

Se entenderá que el diseño de los ambientes de una edificación deberá tomar en cuenta el

tipo de actividad física que será desarrollada allí, pues no es lo mismo construir un aula universitaria, un gimnasio o un dormitorio en una edificación residencial.

La ASHRAE estima que la producción de calor de una persona en reposo o con muy baja actividad física es de 100 W; asume también una superficie corporal promedio de 1,72 m². Con estos datos se calcula una producción unitaria de calor de 58 W/m², cantidad que ha sido asimilada a la unidad de metabolismo: 1 met. = 58 W/m²



Tabla 2. Índice de metabolismo promedio para un ser humano en distintas actividades.

Actividad	Índice [met.]	Calor emitido [W]
Sueño	0,8	85
Sentado tranquilo	1	105
De pie, tranquilo	1,2	125
Trabajo de escritorio	1,2	125
Profesor en actividad	1,6	165
Trabajos domésticos	2 a 3,5	210 a 365
Baile, trabajo intenso	2,5 a 4	260 a 420
Trabajo intenso	8,1	470 W
Deporte intenso	13,7	800 W

Fuente: Aprovechamiento de energía solar – pasiva en edificaciones escolares de regiones rurales remotas. ESMAP -WB. 1998.

2.2.6 Vestimenta

La resistencia térmica de la vestimenta es una variable fundamental cuando hablamos de confort térmico. Naturalmente, cuanto mayor sea el número de prendas que vestimos, menor será el intercambio de calor con el medio ambiente.

El valor medio de la resistencia térmica de una vestimenta ha sido designado por la unidad “clo” (del inglés clothing). Bajo esta unidad, el valor para un traje entero de varón (un terno, por ejemplo), cuya resistencia térmica es de 0,155 m²°C/W, corresponde a 1 clo.

Tabla 3. Resistencia térmica de distintos tipos de vestimenta.

Tipo de vestimenta	Resistencia térmica [clo]
Desnudo	0
Pantalones cortos	0,1
Ropa ligera corta	0,3
Ropa ligera larga	0,5
Ropa gruesa algodón	0,8
Ropa gruesa de lana	1,5
Ropa gruesa - manto grueso	3

Fuente: Aprovechamiento de energía solar – pasiva en edificaciones escolares de regiones rurales remotas. ESMAP -WB. 1998.



2.2.7 El confort y la carta psicrométrica

Una vez descritas las variables climáticas exteriores e interiores, y los conceptos básicos del confort térmico, es preciso describir una herramienta que permita entender el efecto de estos factores sobre la arquitectura y la suficiencia/eficiencia energética de la edificación.

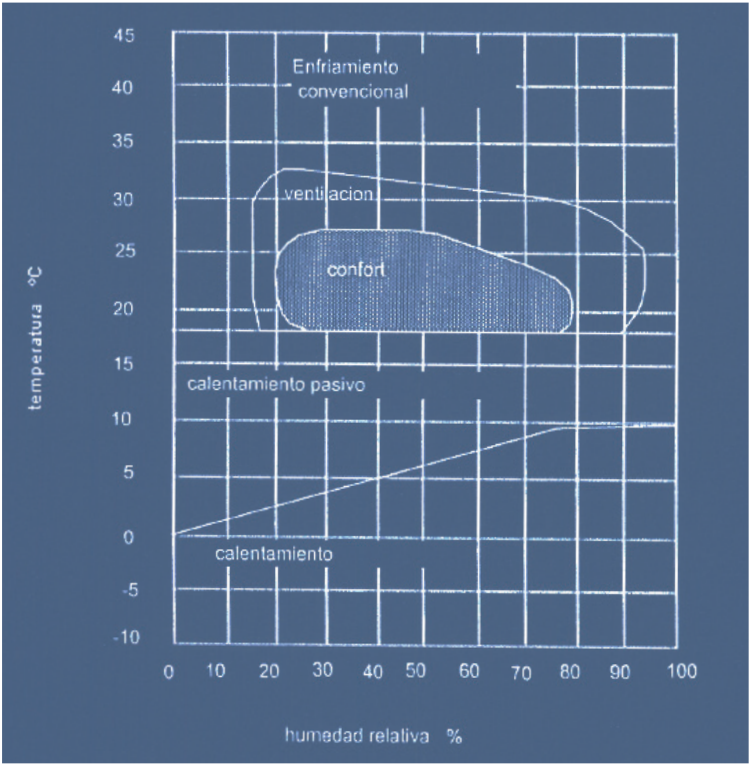
La hipótesis de quiénes desarrollaron estas herramientas sostenía que el diseño arquitectónico podía favorecer o evitar los efectos de las condiciones climáticas exteriores, logrando edificaciones que proporcionen un ambiente interior con determinadas condiciones de confort para los usuarios.

Establecía, además, que dicho estado de confort puede ser alcanzado por medio del uso de sistemas de climatización (refrigeración, calefacción) e iluminación –que demandan energía para su operación–, o incorporando en el diseño estrategias de climatización e iluminación de forma que el confort pueda ser alcanzado de forma natural.

En la década de 1960, los hermanos Olgyay (Viktor y Aladár, arquitectos y urbanistas húngaros) desarrollaron el concepto de Proyecto Bioclimático (Olgyay, 1973) y elaboraron un primer diagrama bioclimático que relacionaba las variables climáticas (temperatura y humedad relativa) con la situación de confort humano. Esta herramienta fue conocida como la Carta Bioclimática de Olgyay (Lamberts et al., 2012: 84) (Figura 5).

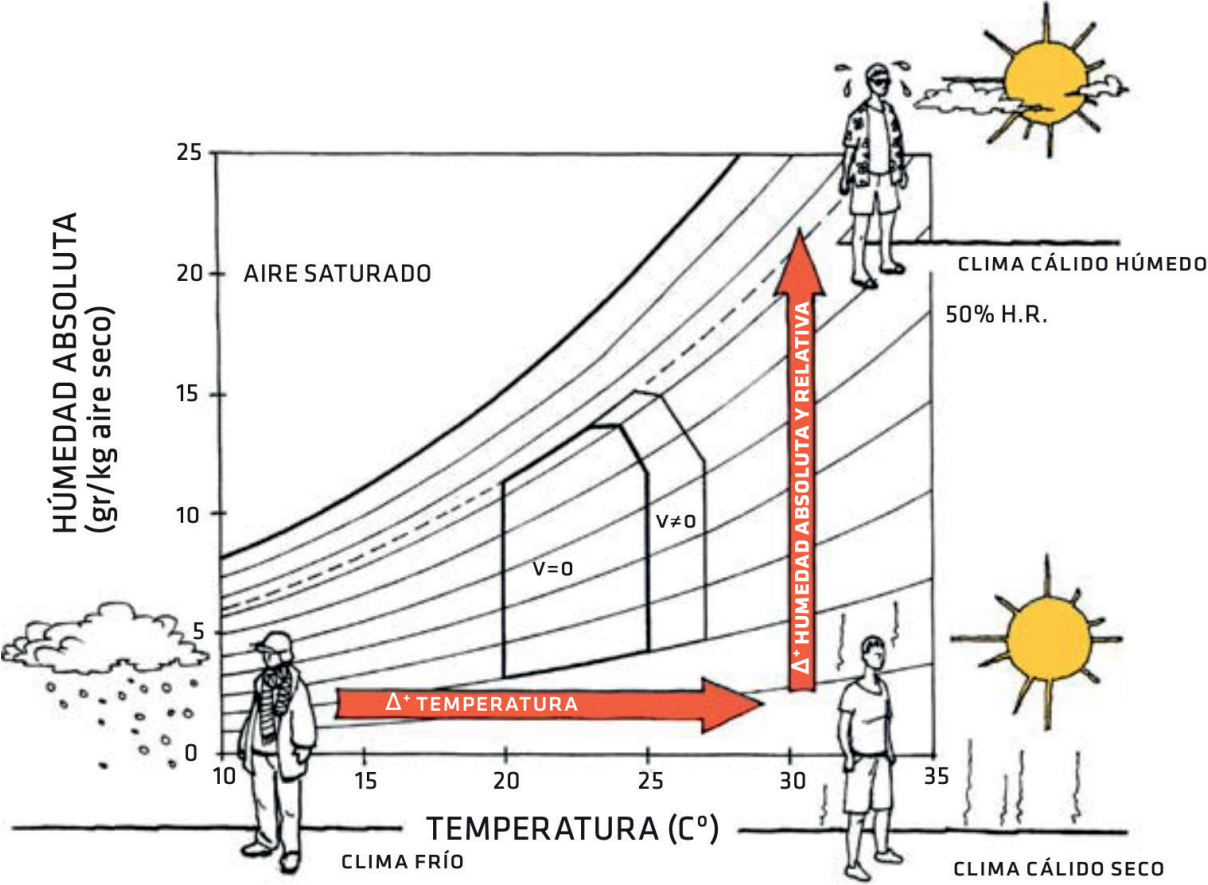
A su vez, y en 1969, Baruch Givoni (arquitecto israelí) concibió una Carta Bioclimática para Edificaciones adaptada sobre la carta psicrométrica (Lamberts et al., 2012: 84). La Figura 6 muestra la carta psicrométrica propuesta por Givoni y lo que se define como zonas de confort a partir exclusivamente de la temperatura y humedad relativa del aire. En esta carta se supone una actividad física ligera (persona sentada) en una vivienda en que la temperatura de aire no difiere significativamente de la temperatura de las paredes (menos de 1.0°C).

Figura 5. Diagrama bioclimático de Olgyay.



Fuente: Aprovechamiento de energía solar – pasiva en edificaciones escolares de regiones rurales remotas. ESMAP -WB. 1998.

Figura 6. Diagrama de confort según B. Givoni (modificado)



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile

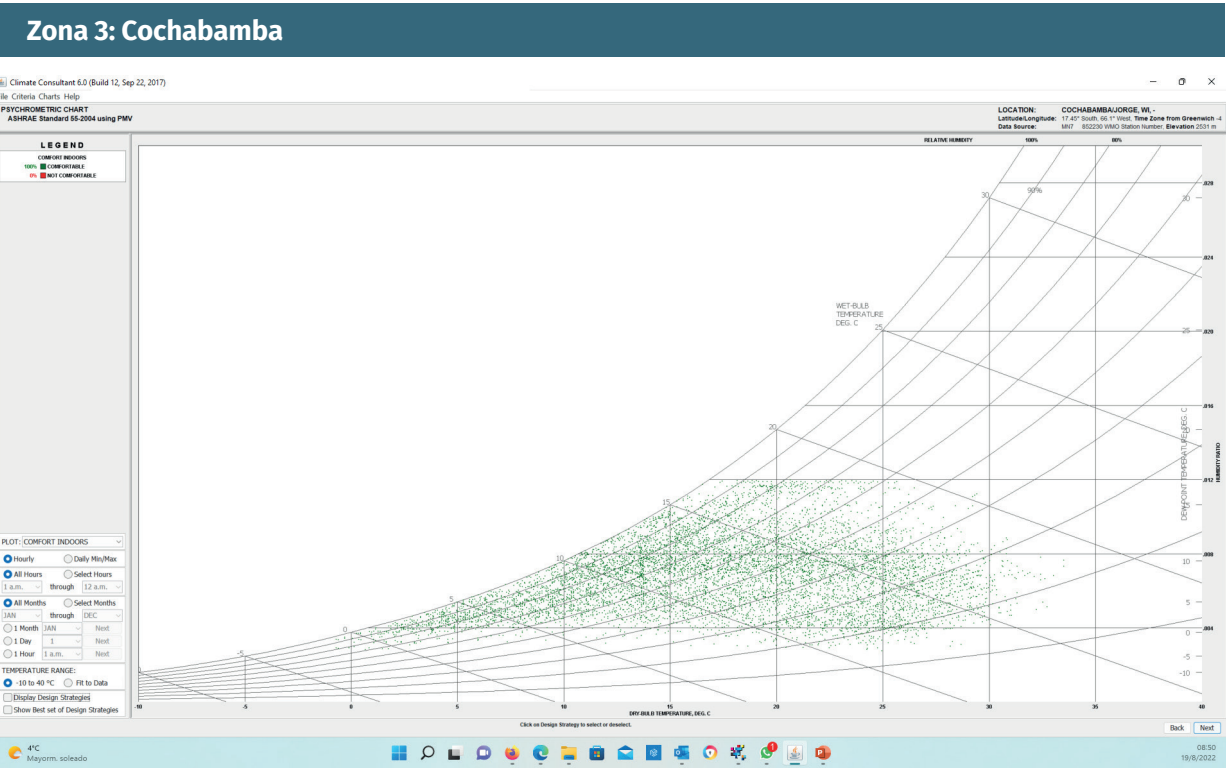
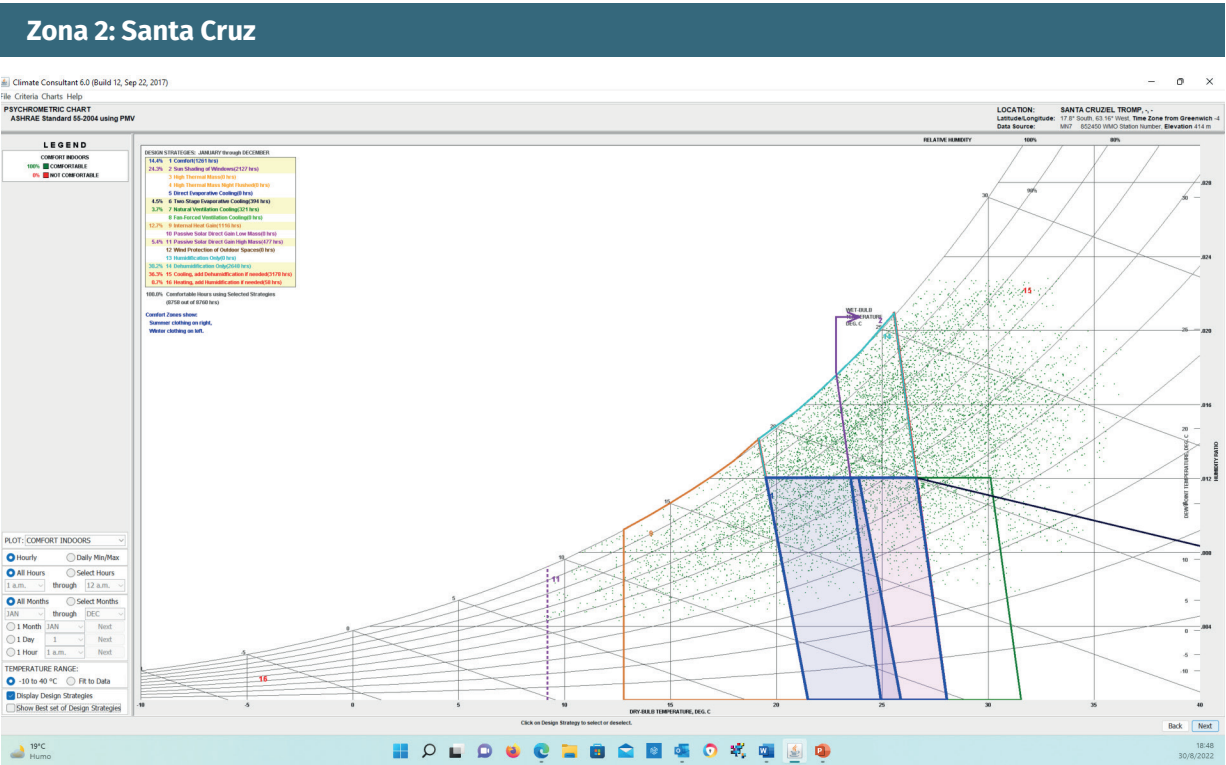
Los límites representados en el diagrama anterior (Figura 6), además de considerar los fenómenos de intercambio de calor, toman en cuenta un límite inferior de humedad, para evitar la desecación bucal y de la faringe, y un límite superior (75%), con el que se evita condensación sobre elementos más fríos del ambiente (Bustamante, et al., 2009: 39).

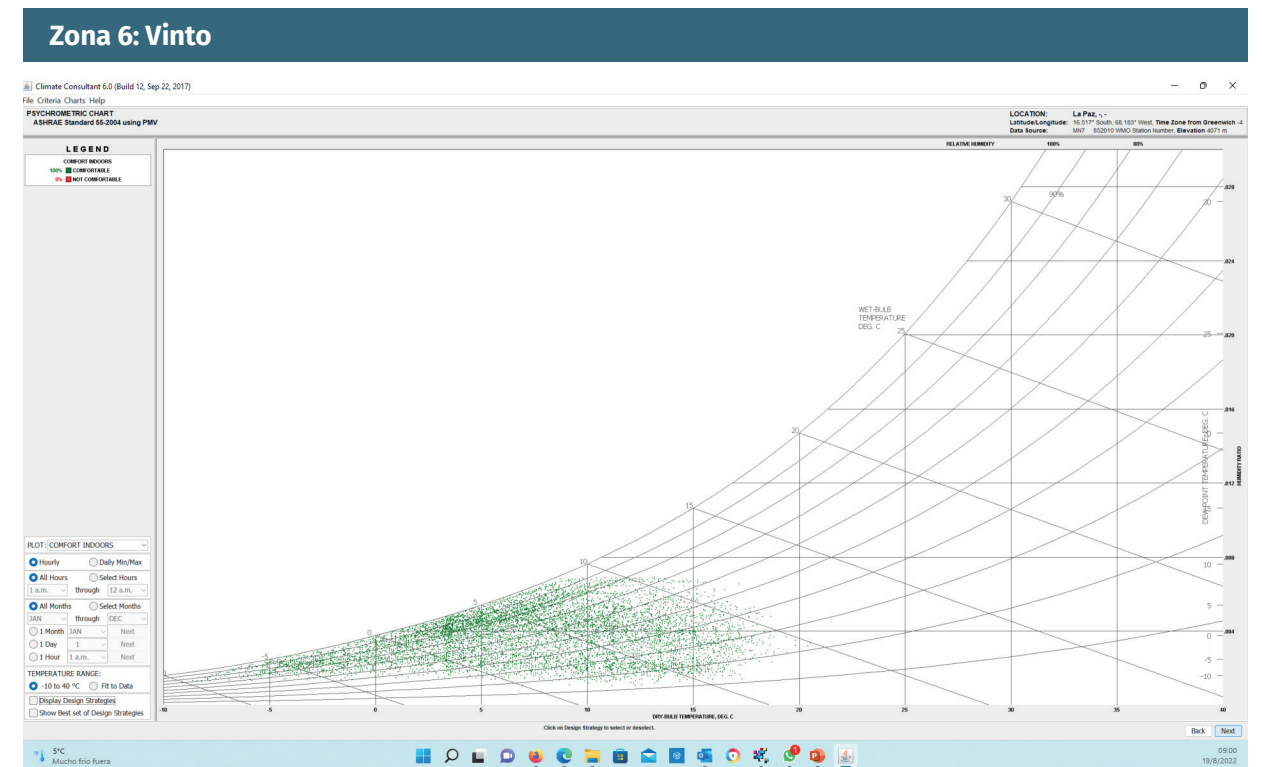
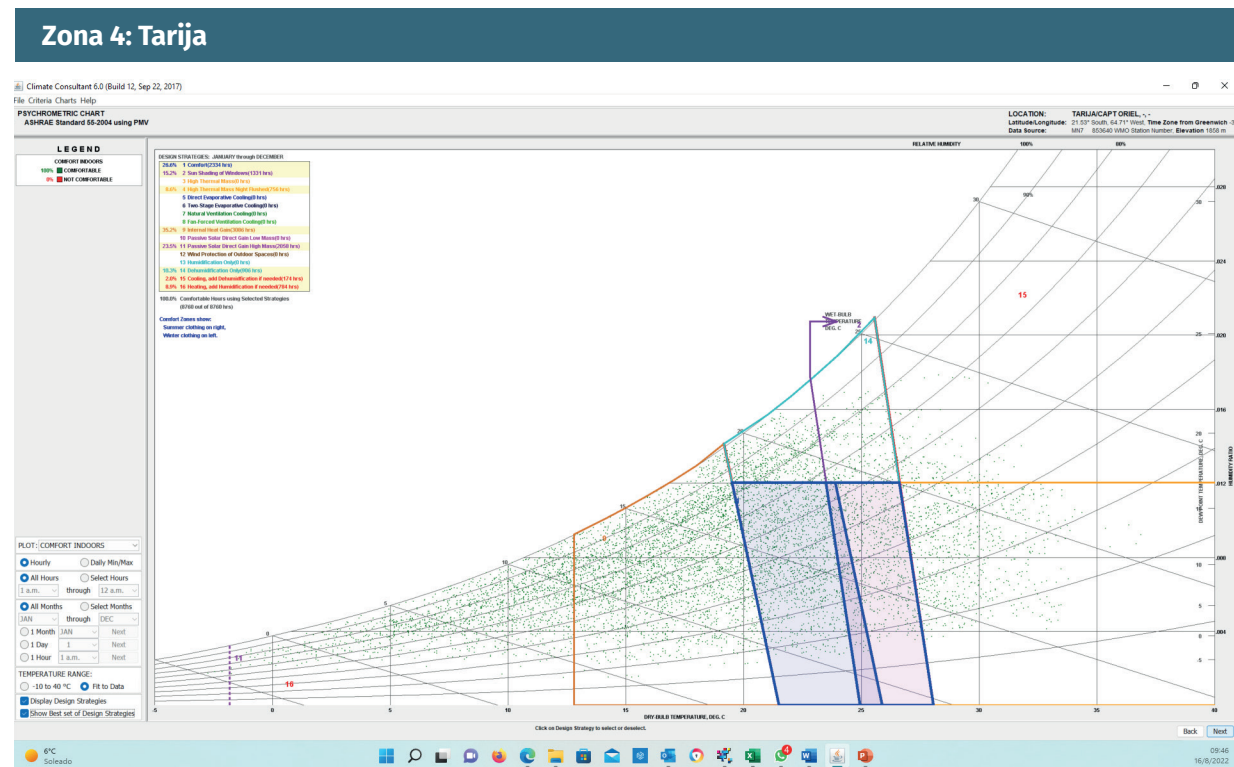
En el diagrama se establece una temperatura inferior de confort de 20°C. Empero, podría suponerse una temperatura inferior de confort en el período nocturno (hasta 18°C), por ejemplo, cuando las personas están bastante más abrigadas que en el día. En verano la temperatura máxima de confort es de 27°C. (Bustamante, et al., 2009: 40).

Es relevante mencionar, de todas maneras, que no es posible establecer un estándar de confort común para todos los países y para todas las culturas en las diversas zonas biogeográficas del país.

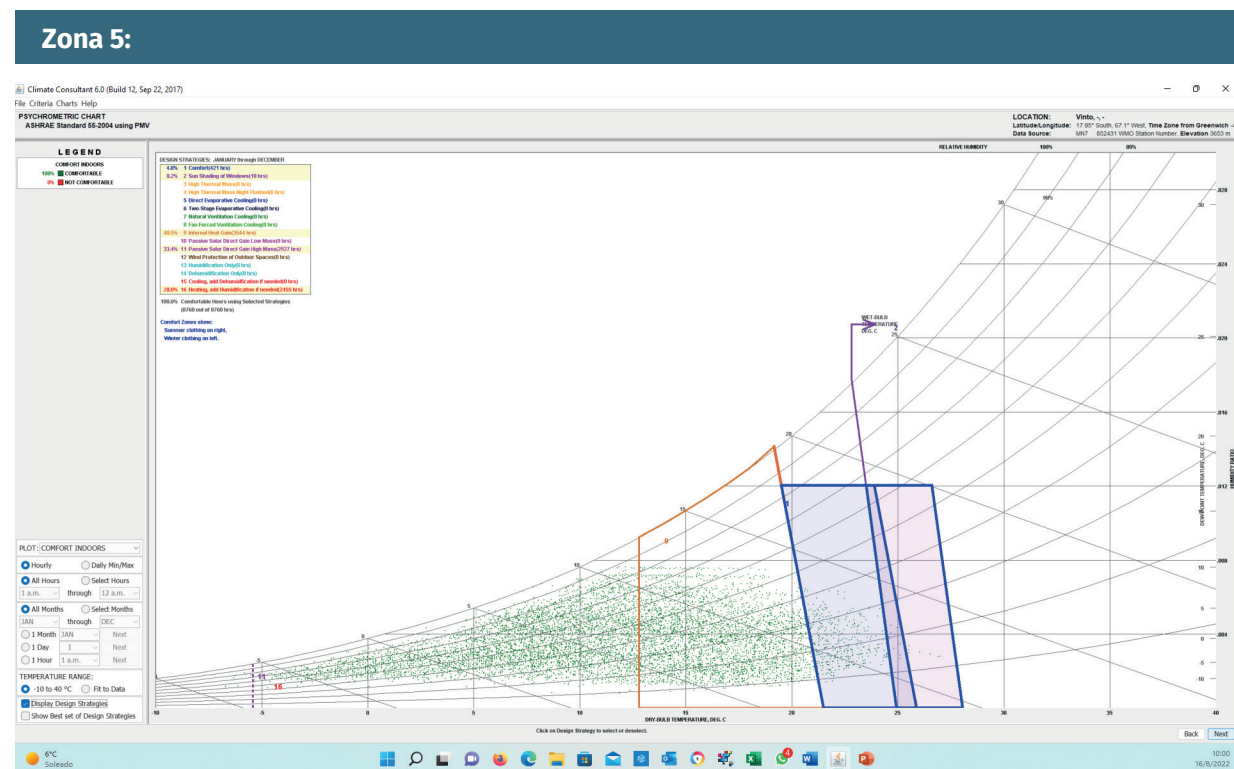
Los diagramas de Givoni presentados a continuación –construidos sobre el diagrama psicrométrico adaptado para lugares representativos de seis zonas biogeográficas de Bolivia, cuya definición se abordará en las secciones siguientes–, relacionan la temperatura, humedad relativa y humedad absoluta del aire, y muestran la situación de confort que proporcionan las condiciones climáticas ambientales.

Figura 7. Diagramas de Givoni para sitios representativos de Bolivia





Fuente: Climate consultant 2017.





4

Definición geográfica y climatológica de Bolivia

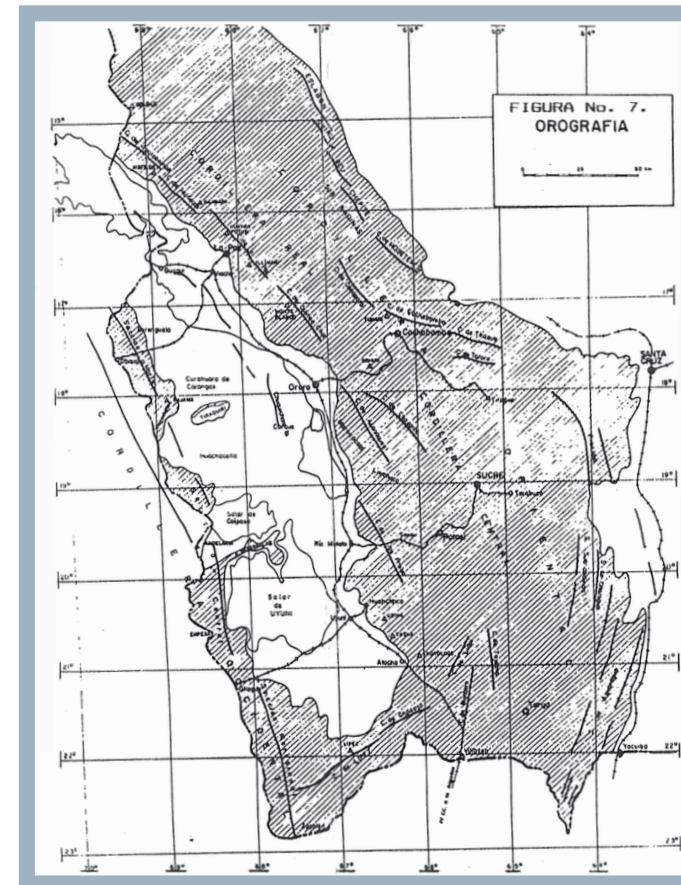
Las referencias conceptuales y gráficas que se utilizan en este acápite proceden de un estudio poco conocido en el país y aportan una mirada distinta (más compleja y completa) de la geografía y el clima en el país. Esas referencias nos entregan, a fin de cuentas, seis zonas biogeográficas en Bolivia.

El rasgo orográfico más importante en Bolivia está constituido por la bifurcación de la Cordillera de los Andes que ocurre en el límite fronterizo entre Perú y Bolivia, y que vuelve a unirse en el límite entre Argentina y Chile. Esta es

la unidad orográfica que da lugar a la Cordillera Occidental y a la Cordillera Oriental, las que, a su vez, encierran al Altiplano boliviano (el 38% del territorio nacional) y abarcan la denominada **Zona de Tierras Altas y Cordilleranas** (Trepp, A., 1986: 5).

Esta definición ha sido extraída del estudio de **Regionalización biogeográfica de Bolivia**, realizado en el marco de la evaluación del uso de recursos energéticos en los países del Pacto Andino, un estudio apoyado por la Junta del Acuerdo de Cartagena.

Figura 8. Orografía

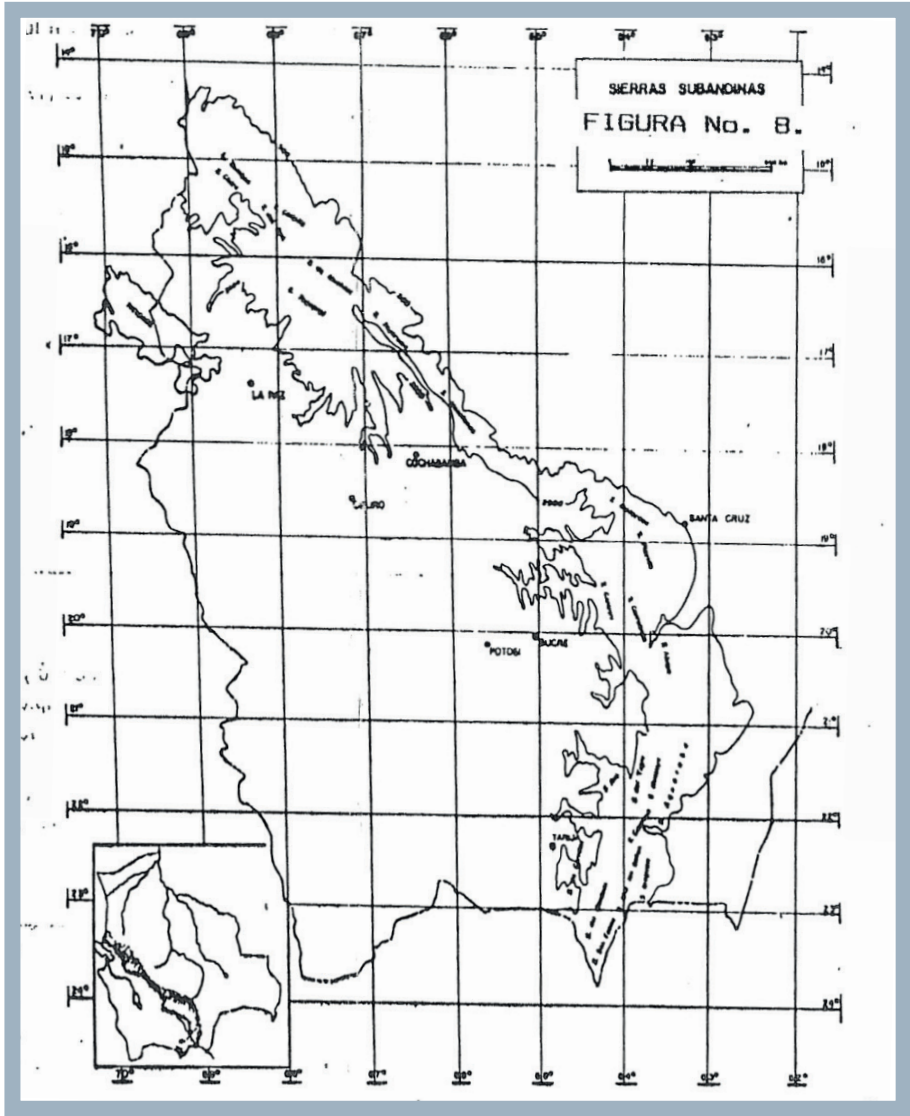


Fuente: Regionalización biogeográfica de Bolivia (Trepp, A., 1986).

En el estudio referido se denomina **Zona de Tierras de Valles** a los contrafuertes de la Cordillera Oriental y a una serie de cadenas montañosas paralelas que se elevan desde las llanuras orientales hasta cotas próximas a los 3.500 m y que toman una dirección Noroeste-

Sureste desde la frontera con el Perú hasta la latitud 19°S, para luego continuar en dirección Norte-Sur hasta la frontera con Argentina, demarcando así la ya mencionada **Zona de Tierras Altas y Cordilleranas** (al Oeste) y la **Zona de Tierras Bajas** (al Este). (Trepp, A., 1986: 5)

Figura 9. Sierras Subandinas

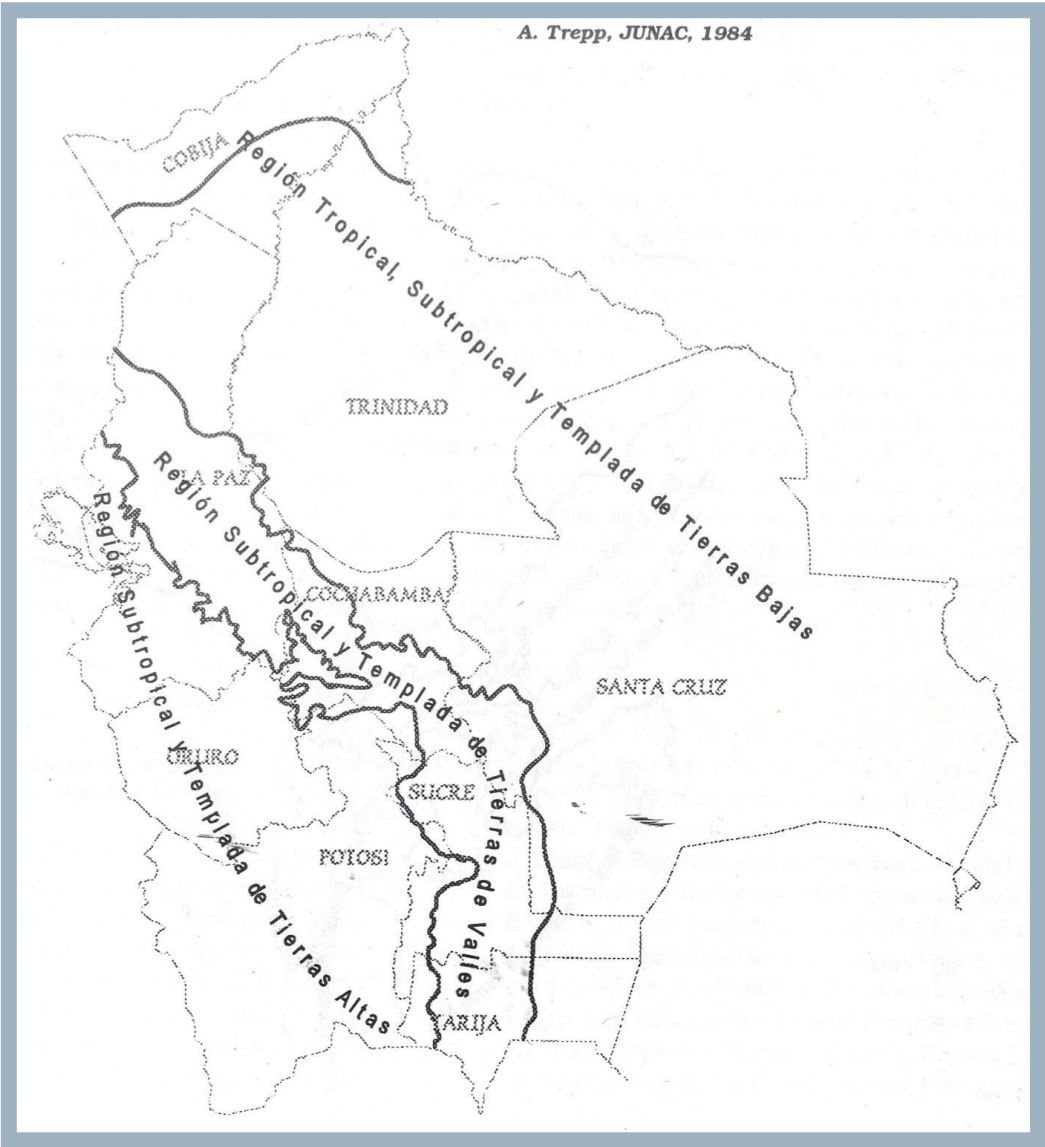


Fuente: Regionalización biogeográfica de Bolivia (Trepp, A., 1986).

Las condiciones geográficas anteriormente descritas condujeron a adoptar, como criterio fundamental, una división de las regiones en función de la altura sobre el nivel del mar como variable que define una primera y principal subdivisión biogeográfica en Bolivia.

En el estudio de **Regionalización biogeográfica de Bolivia** se estableció la cota 900 m como la delimitación entre la **Zona de Tierras Bajas** y la **Zona de Tierras de Valles**, y la cota de 3.500 m como la delimitación entre la **Zona de Tierras de Valles** y la **Zona de Tierras Altas y Cordilleranas**.

Figura 10. Zonas Biogeográficas en Bolivia



Fuente: Regionalización biogeográfica de Bolivia (Trepp, A., 1986).

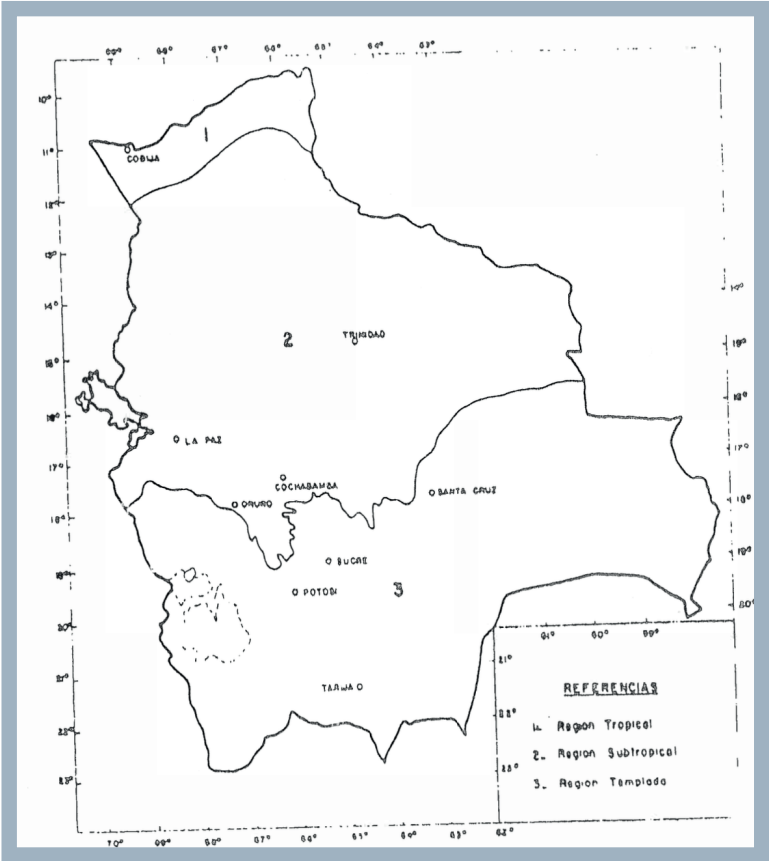
Cada una de las tres zonas biogeográficas señaladas, que presentan condiciones climatológicas muy diferenciadas, se subdividen, adicionalmente, en tres regiones importantes, todas ellas definidas, a su vez, por la variación latitudinal que determina condiciones de temperatura y pluviosidad fundamentales.

En efecto, Bolivia tiene la isoterma de biotemperatura correspondiente a la división entre la Región Latitudinal Tropical y Subtropical alrededor del paralelo 11° de latitud Sur¹.

Además, y en base al marcado cambio florístico que existe entre los 15° y 18° de latitud Sur, desde el extremo Este hasta el extremo Oeste, se establece una línea que divide la Región Subtropical y la Región Templada (Figura 11).

¹ Esta división está basada en las características principales y los valores cualitativos climáticos del modelo matemático de Holdrige.

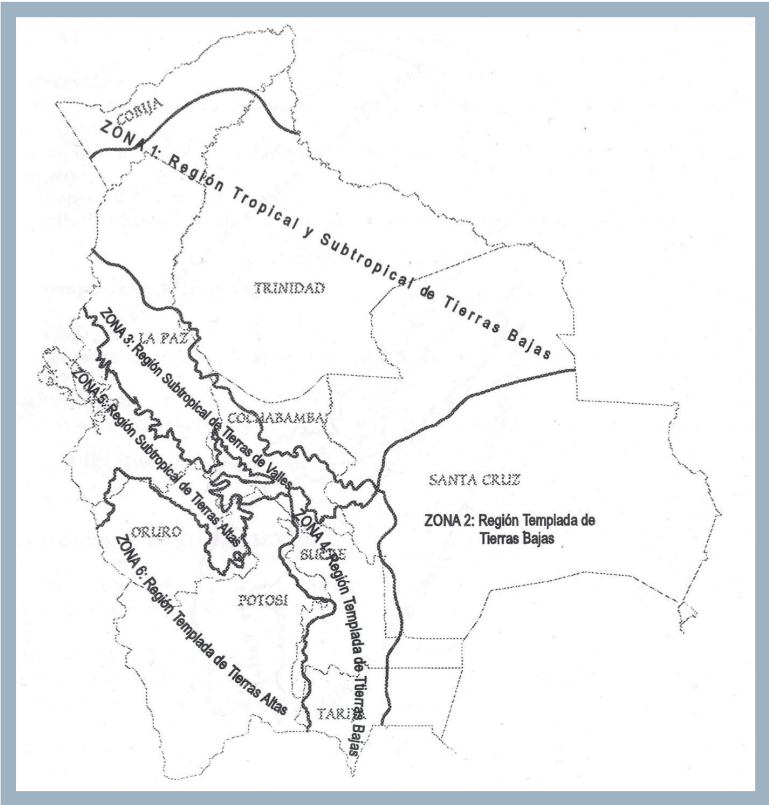
Figura 11. Regiones latitudinales en Bolivia



Fuente: Regionalización biogeográfica de Bolivia (Trepp, A., 1986).

El estudio específico de la pluviosidad, ecología, cobertura boscosa y fisiografía, por su parte, permitió reconocer una marcada diferencia entre las zonas que se encuentran al Norte y al Sur del límite latitudinal entre las Regiones Subtropical y Templada. De esta forma, las tres grandes zonas biogeográficas de Bolivia se subdividen en seis zonas biogeográficas, tres en la región tropical y subtropical, y tres en la región templada (Figura 12).

Figura 12. Zonas Biogeográficas en Bolivia



Fuente: Regionalización biogeográfica de Bolivia (Trepp, A., 1986).

Tabla 4. Zonas biogeográficas en Bolivia

Zona	Nombre	Ubicación	Territorio
ZB1	Región Tropical de Tierras Bajas y Región Subtropical de Tierras Bajas	<ul style="list-style-type: none">a.s.n.m.: <= 900 m.al Norte del Límite Latitudinal Subtropical - Templado.	Varias provincias de los departamentos de Pando, La Paz, Beni, Cochabamba y Santa Cruz.
ZB2	Región Templada de Tierras Bajas	<ul style="list-style-type: none">a.s.n.m. <= 900 mal Norte del Límite Latitudinal Subtropical - Templado	varias provincias de los departamentos de Santa Cruz, Chuquisaca y Tarija.
ZB3	Región Subtropical de Tierras de Valles	<ul style="list-style-type: none">900 m < a.s.n.m. <= 3.500 mal Norte del Límite Latitudinal Subtropical - Templado	varias provincias de los departamentos de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz.
ZB4	Región Templada de Tierras de Valles	<ul style="list-style-type: none">900 m < a.s.n.m. <= 3.500 mal Sur del Límite Latitudinal Subtropical - Templado	varias provincias de los departamentos de Cochabamba, Potosí, Santa Cruz, Chuquisaca y Tarija.
ZB5	Región Subtropical de Tierras Altas	<ul style="list-style-type: none">a.s.n.m. > 3.500 mal Norte del Límite Latitudinal Subtropical - Templado	varias provincias de los departamentos de La Paz, Oruro, Cochabamba y Potosí.
ZB6	Región Templada de Tierras Altas	<p>Ubicación:</p> <ul style="list-style-type: none">a.s.n.m. > 3.500 mal Sur del Límite Latitudinal Subtropical - Templado	varias provincias de los departamentos de Oruro y Potosí.

Fuente: Regionalización biogeográfica de Bolivia (Trepp, A., 1986).





5

La vivienda como un sistema energético

5.1 Envolvente térmica

La envolvente térmica es la parte del edificio que intercambia calor con el exterior. Se asocia (aunque no siempre coincide) a la superficie que debiera ser aislada y podría denominarse como la carcasa del edificio (semejante a la carcasa de un teléfono móvil).

En la vivienda social de una planta, la envolvente térmica está compuesta por la cubierta –techo más cielo raso

cuando la construcción es del tipo “viga vista”, y techo más cielo falso cuando se trata de cubierta con una cámara de aire en el entretecho–, los muros, las ventanas y puertas y el piso.

En rigor, la envolvente térmica la constituyen todas las facilidades constructivas que separan el interior del exterior, es decir, la superficie que intercambia calor con el exterior.

5.2 La transferencia de calor

El objetivo del diseño arquitectónico y térmico de una vivienda es prevenir que ésta –en su interior– sea muy fría en invierno o en climas fríos, y muy caliente en verano o en zonas cálidas.

Si se asume –hipotéticamente– que la temperatura interior de una vivienda se mantiene constante, los sistemas de calefacción y refrigeración deben reponer el calor perdido o eliminar el calor ganado, respectivamente.

La cantidad de calor ganado o perdido será una función de la eficacia que tiene la envolvente

térmica para reducir o incrementar la transferencia de calor entre el interior y exterior de la vivienda.

Debe tomarse en cuenta que el flujo de calor ocurrirá –siempre– desde un punto de mayor temperatura hacia otro de menor temperatura.

Existen cinco mecanismos de transferencia de calor y cambio de estado que son importantes en el diseño de la vivienda: i) radiación, ii) conducción, iii) convección, iv) evaporación y v) condensación.

5.2.1 Radiación

La radiación es la transferencia de calor desde la superficie de un objeto que se encuentra en una elevada temperatura (caliente) hacia la superficie de un objeto más frío o de menor temperatura. Dicha transferencia se realiza a través de ondas electromagnéticas y, en el rango de las temperaturas que ocurren en la edificación, dichas ondas electromagnéticas serán –mayoritariamente– luz infrarroja.

La radiación no calienta el aire a través del cual pasa, pero si calentará cualquier objeto o elemento opaco que se opone a su paso en la

edificación: pisos, muros, muebles y los cuerpos de los habitantes de la vivienda. Esta particularidad será explicada más adelante, al analizar el efecto invernadero dentro de una edificación.

Asimismo, y desde tiempos muy antiguos, se sabe que la radiación solar es uno de los mayores contribuyentes a la ganancia de calor de una edificación. Ésta es interceptada por los elementos opacos del sitio expuesto a la radiación, como la vegetación, los accidentes topográficos y los elementos opacos y transparentes de las edificaciones.

La radiación solar incidente sobre una edificación proviene de:

- La radiación solar directa (radiación en onda corta);
- La radiación solar difusa (radiación en onda corta);
- La radiación solar reflejada por el suelo o el entorno (radiación en onda corta);
- La radiación térmica emitida por el suelo calentado (radiación en onda larga); y
- La radiación térmica emitida por otros elementos opacos calentados por alguno de los anteriores (radiación en onda larga).

La radiación reflejada por el suelo y los elementos opacos que rodean a la edificación dependerá del albedo, es decir, de las características reflectivas de la superficie reflectora (Lamberts et al., 2012: 113).

La cantidad de radiación captada y transmitida al interior de la edificación estará determinada por las propiedades de los elementos de la envolvente y el nivel de sombra al que estará sometida la vivienda.

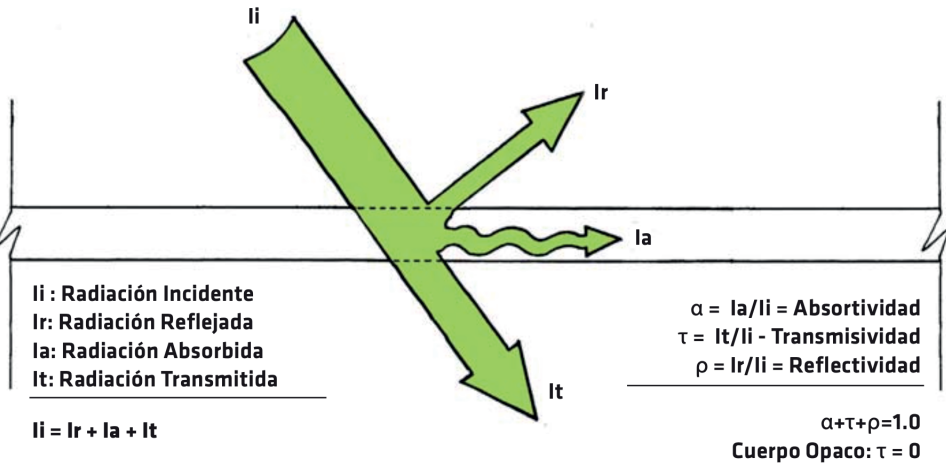
La captación solar en la vivienda se realiza a través de los elementos de la envolvente, principalmente elementos transparentes y –en menor grado– a través de los elementos opacos.

La radiación solar incidente (li) sobre un elemento opaco o transparente de la edificación, puede ser absorbida (la), reflejada (lr) o transmitida (lt) hacia el interior de ésta. La magnitud de esta transferencia de calor dependerá de la absorbancia térmica (a), la reflectividad (r) y la transmisividad de la superficie transparente (t), respectivamente.

Por tanto, y por definición, se cumplirá que:

$$li = lr + la + lt$$
$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Figura 13. Absorción, transmisión y reflexión de la radiación sobre una superficie



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile

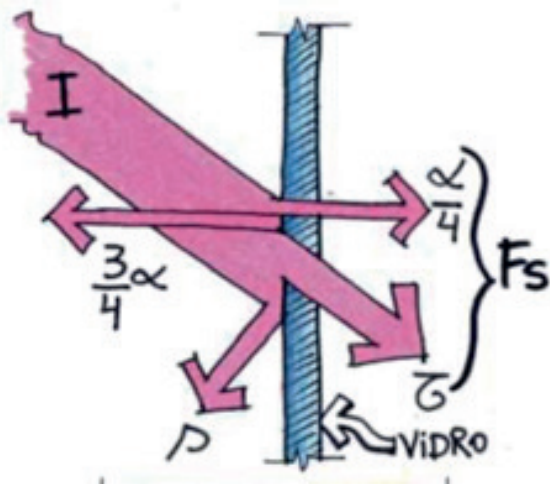
Las propiedades mencionadas se detallan haciendo distinción entre elementos opacos y elementos transparentes. Veamos.

5.2.1.1 Elementos transparentes

La magnitud de la transmisión de radiación solar a través de elementos transparentes como vidrios de ventanas y puertas, claraboyas, tragaluces y cualquier otro elemento transparente en la arquitectura de la edificación, está determinada por el Factor Solar. Éste puede ser entendido como un índice de eficacia de transmisión de radiación solar a través de la superficie transparente. Se calcula dividiendo la cantidad de energía solar que ingresa al ambiente –por conducción y transmisión– entre la cantidad de radiación incidente.

El valor del Factor Solar es una característica propia de cada tipo de abertura y varía con el ángulo de incidencia de la radiación solar. Así, por ejemplo, la mayor parte de la radiación incidente en el vidrio es transmitida directamente al interior de la vivienda, sumándose la porción de la radiación absorbida por el vidrio que también es emitida dentro de la edificación.

Figura 14. Factor Solar (FS) en un elemento transparente



Fuente: Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012).

Las siguientes tablas presentan valores de Factor Solar para algunos tipos de vidrio y protecciones solares externas e internas más comunes.

Tabla 5. Valores de Factor Solar (FS) para aberturas con superficies transparentes

Superficie transparente			FS	Referencia
Vidrios	Transparente simple	3 mm	0,87	ASHRAE (1993)
		6 mm	0,83	
	Transparente doble	3 mm	0,75	Pereira (1991)
		6 mm	0,60	
	Verde	3 mm	0,72	ASHRAE (1993)
		6 mm	0,60	
Películas	Reflexiva	3 mm	0,26-0,37	ASHRAE (1993)
		6 mm	0,25 - 0,50	
	Absorbente		0,40 - 0,50	Aroztegui (1983)
Acrílico	Claro		0,85	ASHRAE (1993)
			0,64	
			0,18	
Policarbonato	Claro		0,70	ASHRAE (1993)
			0,64	
Tragaluces	Claro		0,70	ASHRAE (1993)
			0,40	
Bloque de vidrio	Transparente		0,56	

Fuente: Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012).

Tabla 6. Valores de Factor Solar (FS) para aberturas con protección solar

Protección solar		FS	Referencia
Internas	Cortina translúcida	0,50 – 0,75	ASHRAE (1993), Shukuya y Kimura (1987), Aroztegui (1983)
	Cortina semi-translúcida	0,40 – 0,60	
	Cortina opaca	0,35 – 0,60	
	Persiana inclinada a 45°	0,64	ASHRAE (1993)
	Persiana cerrada	0,54	
Externas	Toldo 45° translúcido	0,36	Aroztegui (1983)
	Toldo 45° opaco	0,20	
	Venecianas/ quiebra vista (madera o plástico)	0,09	
	Estera de madera	0,09	Pereira y Sharples (1991)
	Veneciana horizontal	0,19	
	Brisa horizontal	0,25	

Fuente: Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012)

5.2.1.2 Elementos opacos

La ganancia solar a través de elementos opacos depende principalmente de la absorbanca térmica de la superficie del sistema constructivo y de la transmitancia térmica del mismo.

La absorbanca térmica de un material es una propiedad que permite absorber la radiación en

forma de calor y está determinada por el color de la superficie y su grado de pulimento. Se deduce que mientras mayor sea la absorbanca térmica del material, mayor será la captación de calor. La Tabla 7 a continuación muestra valores de absorbanca térmica de varios materiales y colores.

Tabla 7. Absorbanca (a) y emisividad (e) de materiales y colores

Tipo de superficie	a	e
Placa de aluminio nueva y brillante	0,05	0,05
Placa de aluminio oxidada	0,15	0,12
Placa de acero galvanizado (Nueva y brillante)	0,25	0,25
Concreto	0,65 – 0,80	0,85 – 0,95
Teja de cerámica	0,75 – 0,80	0,85 – 0,95
Ladrillo visto	0,65 – 0,80	0,85 – 0,95
Revoque claro	0,30 – 0,50	0,85 – 0,95
Revestimiento asfáltico	0,85 – 0,98	0,90 – 0,98
Vidrio común en ventana	Transparente	0,90 – 0,95
Pintura blanca	0,20	0,90
Pintura amarilla	0,30	0,90
Pintura verde claro	0,40	0,90
Puntura “aluminio”	0,40	0,50
Pintura verde oscuro	0,70	0,90
Pintura roja	0,74	0,90
Pintura negra	0,97	0,90

Fuente: NBR 15220-2 en Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012).

Por su parte, la transmitancia térmica de un elemento opaco constituye su capacidad de transferir calor por conducción. Cuanto mayor sea su magnitud, mayor será su capacidad de transferencia. Se hará referencia detallada a esta propiedad en la sección dedicada a la transferencia de calor por conducción.

La incidencia directa de la radiación solar en el cerramiento opaco logrará que la temperatura de la superficie externa se incremente a un valor muy superior a la temperatura del aire del medio ambiente. Así, los elementos opacos exteriores sometidos a la radiación solar adquirirán una temperatura de superficie superior a la que se podría registrar en los elementos opacos no asoleados, pese a que ambos se encuentran en el mismo ambiente.

5.2.2 Conducción

Se refiere al flujo de calor a través de un elemento sólido –como los muros, cubierta, piso o vidrios de la vivienda– debido a la conductividad térmica del material que lo compone.

5.2.2.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica (l) [W/mK] de un material define la cantidad de calor que pasa a través de una unidad de superficie con caras planas y paralelas, en una unidad de tiempo y con una diferencia de temperatura de 1 K (Díaz, 2011: 43). Se trata de una propiedad del material muy relacionada con su densidad: materiales de alta conductividad –como los metales– tendrán una gran capacidad de transferir calor; por el contrario, materiales de baja conductividad –como los aislantes– tienen escasa capacidad de transferir calor por conducción. La siguiente tabla muestra algunos ejemplos de la definición útiles para la selección de materiales al momento de diseñar la vivienda social.

Como se verá en la sección dedicada a la transferencia de calor por conducción, el incremento de temperatura en la superficie exterior favorecerá una mayor transferencia de calor por conducción hacia el interior de la edificación.

La temperatura mencionada se calcula de la siguiente forma:

tsolar=*α***I***Rse*

Donde:

α es la absorbanca térmica de la superficie externa del elemento opaco;

I es la radiación total incidente sobre el elemento [W/m²]; y

Rse es la resistencia térmica superficial externa [m²K/W].



Tabla 8. Densidad y conductividad térmica de algunos materiales

Material	Densidad [kg/m³]	λ [W/mK]
Hormigón normal	2.200 – 2.400	1,750
Hormigón ciclópeo	1.700 – 2.100	1,400
Mortero arena-cemento 1:3	700 – 800	0,290
Mortero arena-cemento 1:6	600 – 700	0,240
Revoque de yeso proyectado	1.100 – 1.300	0,500
Revoque de yeso planchado. Yeso cartón	750 – 1.000	0,350
Revoque de yeso c/ arena y cemento	700 – 900	0,300
Ladrillo y teja cerámica	1.000 – 1.500	0,700
	1.300 – 1.600	0,900
	1.600 – 1.800	1,000
	1.800 – 2.000	1,050
Madera de pino y cedro	600 – 750	0,230
	450 – 600	0,150
	300 – 450	0,120
Aglomerados de madera	850 – 1000	0,200
	200 – 250	0,058
Placa prensada	450 – 550	0,120
	350 – 450	0,100
Arena seca	1.500	0,300
Arena saturada	2.500	1,880
Acero y hierro fundido	7.800	55
Aluminio	2.700	230
Zinc	7.100	112
Cobre	8.900	380
Granito	2.300 – 2.900	3,000
Basalto	2.700 – 3.000	2,200
Material calcáreo / mármoles	>2.600	2,900
Lana de roca	20 – 200	0,045
Lana de vidrio	10 – 100	0,045
Poliestireno expandido moldeado	15 – 35	0,045
Poliestireno expandido	25 – 40	0,035
Poliuretano expandido	30 – 40	0,030
Poliestireno granular	20 – 100	0,050

Fuente: Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012).

5.2.2.2 Resistencia térmica

Se denomina resistencia térmica de un material a su efectividad para resistir el flujo de calor en condiciones estacionarias. Esta propiedad se mide para materiales homogéneos sobre la base de un espesor unitario (Residential Heat Loss and Heat Gain Calculations Manual, 1996: 33). Se calcula dividiendo el espesor del material entre la conductividad del mismo:

$$R = \frac{e}{\lambda} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$$

Donde:
R es la Resistencia Térmica del material [m²K/W];
e es el espesor del material [m]; y
λ es la Conductividad térmica del material [W/mK].

Se concluye que cuanto más alto es el valor de la resistencia térmica de un material, éste será más aislante y la transferencia de calor a través de su masa tomará mucho más tiempo.

La resistencia térmica de un material heterogéneo se calcula a través de la suma de las resistencias térmicas de cada elemento que compone el material. Dicha suma puede realizarse, en serie o en paralelo, según las reglas de la transferencia de calor.

Un ejemplo de la resistencia térmica calculada en serie se encuentra en el piso de la vivienda: está compuesto por una losa de concreto macizo de 10 cm. de espesor, sobre el cual se coloca una capa de mortero de arena y cemento de unos 3 cm de espesor, como soporte a una carpeta cerámica de 0,8 cm de espesor. La resistencia térmica estará constituida por la suma de la resistencia térmica de uno de estos elementos.

5.2.2.3 Resistencia térmica superficial

La resistencia térmica superficial, tanto en el interior como en el exterior del elemento bajo análisis, traduce los efectos de los intercambios de calor por radiación y convección entre la superficie del material y el aire circundante. La resistencia térmica superficial dependerá del sentido del flujo de calor.

Por ejemplo, si la edificación está situada en las zonas biogeográficas tropical y subtropical de tierras bajas, la temperatura del medio exterior será mayor a la del ambiente interior de la edificación. En este caso, el revoque exterior de la pared de cerramiento recibirá calor transmitido desde el aire exterior por radiación y convección.

A su vez, el incremento de la temperatura de la superficie exterior del muro será proporcional a su resistencia térmica superficial (Rse), la misma que depende, en gran medida, de la velocidad del aire circundante. Dicho incremento de temperatura provocará un flujo de calor hacia el interior de la edificación a través del muro, provocando la elevación de la temperatura de todos los materiales.

Igualmente, un ejemplo de la resistencia térmica calculada en paralelo se puede encontrar en una pared compuesta por ladrillo macizo y juntas de mortero de cemento. La resistencia térmica será calculada según la fórmula a continuación:

$$R_T = \frac{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}{\left(\frac{A_1}{R_1} + \frac{A_2}{R_2} + \dots + \frac{A_n}{R_n}\right)}$$

Donde:

A1, A2, ...,An es el área de cada uno de los componentes del elemento, transversal al sentido del flujo de calor [m²]; y

R1, R2, ...,Rn es la resistencia térmica de cada uno de los componentes del elemento [m²K/W].

Cuando el calor haya atravesado todo el muro y arribado al límite interno del muro (revoque interior) el intercambio de calor entre la superficie interior del muro y el aire del medio ambiente ocurrirá por convección y radiación y será proporcional a la resistencia térmica interior (Rsi).

Tabla 9. Resistencia térmica superficial

Sentido del flujo de calor	RSI [m²K/W]	RSE [m²K/W]
Flujo horizontal en ambos sentidos	0,13	0,04
Ascendente	0,10	0,04
Descendente	0,17	0,04

Fuente: Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012).

Para los fines prácticos, la resistencia térmica total de un elemento constructivo –como las paredes, cubierta o piso– es calculada sumando la resistencia térmica individual de cada uno de sus componentes, más las resistencias térmicas superficiales.



5.2.2.4 Transmitancia térmica

Cada una de las capas de un cerramiento opaco o transparente tiene una resistencia térmica diferente. Por definición, la transmitancia térmica será la inversa de la resistencia térmica total. Esto es:

$$U = \frac{1}{R_T} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Donde:

U es la transmitancia térmica del elemento [W/m²K]; y

R_T es la resistencia térmica total del elemento e incluye las resistencias térmicas superficiales interior y exterior [m²K/W].

La transmitancia térmica constituye la variable más importante para evaluar el comportamiento térmico de cualquier componente de la envolvente térmica (Lamberts et al., 2012: 215). La siguiente tabla muestra los valores de transmitancia térmica.

Tabla 10. Resistencia térmica superficial

Elemento	Descripción	U [W/m²K]
Paredes	Ladrillo de 6 huecos. e=12 cm	2,39
	Ladrillo de 6 huecos. e=16 cm	2,08
	Ladrillo de 6 huecos + revoque de yeso	2,10
	Ladrillo gambote. e=12 cm.	2,44
	Ladrillo gambote con aislación EIFS 5 cm	0,62
Pisos	Ladrillo + cerámica	2,41
	Ladrillo + cerámica + EPS 5 cm bajo losa	0,61
	Losa de concreto + cerámica	2,87
Cubiertas	Cubierta de calamina	7,14
	Cubierta de calamina + cielo raso + Lana de vidrio 10 cm	0,40
	Cielo falso de yeso ventilado	5,37
	Cubierta de teja con estructura de madera. No ventilado	2,01
	Cubierta de teja con estructura de madera. Ventilado	3,75
Ventanas	Vidrio simple con marco de aluminio	5,5
	Vidrio DVH con marco de aluminio	2,74

Fuente: Lamberts et al., 2012; PEEER, 2022; Guzmán, JC. 2016.

5.2.2.5 Flujo de calor

El flujo de calor por conducción se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = U * A * \Delta t \text{ [W]}$$

Donde:

Q es el Flujo de calor a través del elemento [W];

U es la transmitancia térmica del elemento [W/m²K]; y

Δt es la diferencial de temperatura entre el interior y exterior del elemento en el sentido del flujo de calor [°C].

En el caso de los muros sometidos a la radiación solar, el flujo de calor se verá afectado por la temperatura tsol-ar:

$$Q = U * A * (t_{SOL-AR} + t_{ext} - t_{int}) \text{ [W]}$$

Donde:

Q: es el Flujo de calor a través del elemento [W].

U: es la transmitancia térmica del elemento [W/m²K].

t_{sol-ar}: es la temperatura superficial del elemento sometido a radiación [°C].

t_{ext}: es la temperatura del aire en el exterior [°C].

t_{int}: es la temperatura del aire en el interior de la edificación [°C].

5.2.3 Convección

La conexión expresa la transferencia de calor a través del movimiento de líquidos y gases. Dado que el aire (gas) adquiere calor por conducción en contacto con el piso, las paredes o la cubierta, el fluido se expandirá, se tornará menos denso y ascenderá, colocándose por encima de fluidos más fríos y más densos. Las corrientes formadas transferirán calor a los objetos con los que toman contacto. Este mecanismo se conoce como convección natural.

Por definición, el intercambio de aire entre el interior y exterior de una edificación es el principal mecanismo de transferencia de calor por

convección. En el mismo sentido, la ventilación –natural o mecánica– es un mecanismo de transferencia de calor por convección. Así entendida, la ventilación promoverá el flujo de calor, con fines de calefacción o refrigeración, a través del movimiento del aire.

Debe anotarse, además, que el campo limitado a la ganancia o pérdida de calor sensible, las infiltraciones a través de los elementos de la envolvente térmica constituyen también un mecanismo de transferencia de calor por convección.

5.2.4 Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual la humedad es convertida en vapor. Este proceso contempla un cambio de estado –de líquido a vapor– e involucra al calor latente de vaporización.

Dado que la humedad evaporada proviene –muchas veces– de una superficie caliente, el calor necesario para la evaporación es obtenido de

la superficie caliente, por tanto, la evaporación conlleva un enfriamiento de la superficie.

Las infiltraciones de aire a través de los elementos de la envolvente térmica, aquellos que involucran cambio de estado en el aire sujeto a movimiento –excediendo el campo del calor sensible–, suponen transferencia de calor por evaporación.

5.2.5 Condensación

La condensación es el proceso inverso a la evaporación. Es el proceso mediante el cual el vapor se convierte en humedad sobre la superficie que condensa, e involucra también un cambio de estado y una cantidad de calor latente de condensación.

El ejemplo más evidente de este fenómeno es la aparición de gotas de agua cuando una masa de

vapor de aire presente en el aire –por ejemplo, en la cocina de una vivienda–, toca una superficie mucho más fría –como un muro o un vidrio– y se convierte en una película de moléculas de agua (empañado) y posteriormente en otras moléculas lo suficientemente grandes –y en forma de gotas de agua– como para deslizarse por las paredes verticales.

5.3 Los sistemas mecánicos y eléctricos en el interior de la vivienda

Son los equipos y dispositivos, mecánicos y/o eléctricos, que se encuentran en el interior de la vivienda y que contribuyen a la generación de calor o humedad; pueden, igualmente provocar el movimiento del aire interior.

En este grupo se encuentran los equipos de calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria (duchas y calefones), cocción de alimentos, extracción de aire y ventilación, iluminación, comunicación e información, etcétera.

5.4 Los habitantes de la vivienda

Son las personas, plantas y animales que habitan en el interior de la vivienda y liberan calor, humedad y dióxido de carbono dentro de la misma.

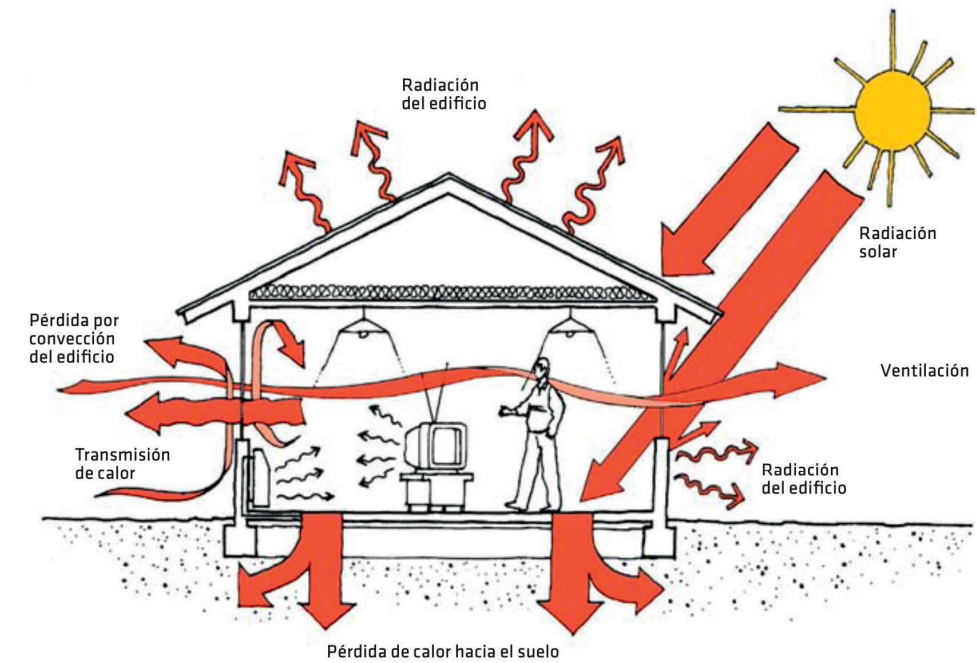
La cantidad de calor que emiten los habitantes en el interior de la edificación, como se vio en una sección anterior, será función de su actividad metabólica.

5.5 Balance térmico

La magnitud de la transferencia de calor, por los mecanismos analizados en secciones anteriores, varía a cada instante, a lo largo de cada día y durante todo el año. Esto ocurre porque las condiciones climáticas del exterior y la actividad energética al interior de la edificación cambian permanentemente.

La siguiente Figura –tomada de la Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile– muestra gráficamente los mecanismos de transferencia de calor que ocurren en una edificación.

Figura 15. Mecanismos de transferencia de calor en un recinto



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile (2009).

Siguiendo la ilustración, y a manera de ejemplo, cabe situarnos en un determinado instante del día en el que la temperatura del medio ambiente exterior es mayor a la del interior de la edificación. En ese momento, se presentarán varios mecanismos por los cuales la edificación experimenta una ganancia de calor. Veamos cuáles son esos mecanismos:

- Por conducción desde el exterior a través de muros y cubierta. La transferencia de calor por conducción, en este caso, será mayor en todos los elementos que en dicho instante estén expuestos a la radiación solar, debido a su mayor temperatura.
- Debido a la radiación solar que se transmite a través de las ventanas.
- Por efecto de las infiltraciones a través de las aberturas que existen en la envolvente y por la ventilación mecánica de la edificación.
- Por efecto de los equipos de calefacción, iluminación, comunicación, cocción de alimentos y calentamiento de agua.
- Por el calor emitido por los habitantes de la edificación.

Por otra parte, y en una determinada hora de la noche en la que la temperatura del ambiente exterior es menor a la del interior de la vivienda, podrían ocurrir los siguientes tipos de transferencia de calor:

- Pérdida de calor por conducción por efecto de la diferencial de temperatura, desde el interior de la edificación hacia el medio ambiente exterior, a través de muros, piso, cubierta y ventanas.
- Pérdida de calor debido al intercambio de aire con el exterior por medio del cual el aire calentado sale de la edificación y es sustituido –a través de infiltraciones– por el aire frío del exterior.
- Ganancia de calor por efecto de los equipos de calefacción, iluminación, comunicación, cocción de alimentos y calentamiento de agua.
- Por el calor emitido por los habitantes de la edificación.
- Pérdida de calor por radiación a través de los elementos transparentes de la edificación.



6

Estrategias de diseño pasivo

La presente sección contiene recomendaciones de tipo general para el diseño de edificaciones cuyo desempeño energético es elevado, es decir, aquellas edificaciones que ofrecen condiciones ambientales interiores dentro del rango de confort y que demandan una mínima cantidad de energía adicional para lograrlo.

Las recomendaciones están enmarcadas en el campo de las estrategias de diseño pasivo. Con esto, nos referimos a un enfoque de diseño de las edificaciones donde sus elementos básicos, tales como las ventanas, muros y pisos, hacen de la edificación un sistema que capta, refleja, almacena y redistribuye la energía solar de manera controlada y sin el uso de ventilación mecánica, bombas o sistemas complejos de control.

Cada una de las recomendaciones planteadas es analizada contraponiendo las características climáticas de las zonas biogeográficas de Bolivia, de manera tal que el lector considere las diversas

situaciones climáticas del país para lograr edificaciones que ofrezcan el máximo confort térmico con el mínimo consumo energético.

6.1 Oferta y aprovechamiento de radiación solar

Se ha mencionado en secciones anteriores que la radiación solar constituye la principal contribución, de origen natural, a la ganancia de calor de las edificaciones.

Se mencionaron también sus componentes: la radiación directa, la radiación difusa, la radiación reflejada, la radiación térmica emitida por los elementos calientes del entorno, y la radiación emitida por el mismo edificio. Al mencionarlas,

se hizo referencia a la frecuencia y la energía de cada componente.

En esta sección se realizará una aproximación a la variación estacional de la radiación a lo largo del año y, en función de la orientación de cada elemento de una edificación, a la forma de captarla, almacenarla y, finalmente, evitarla, cuando ésta no es deseable.

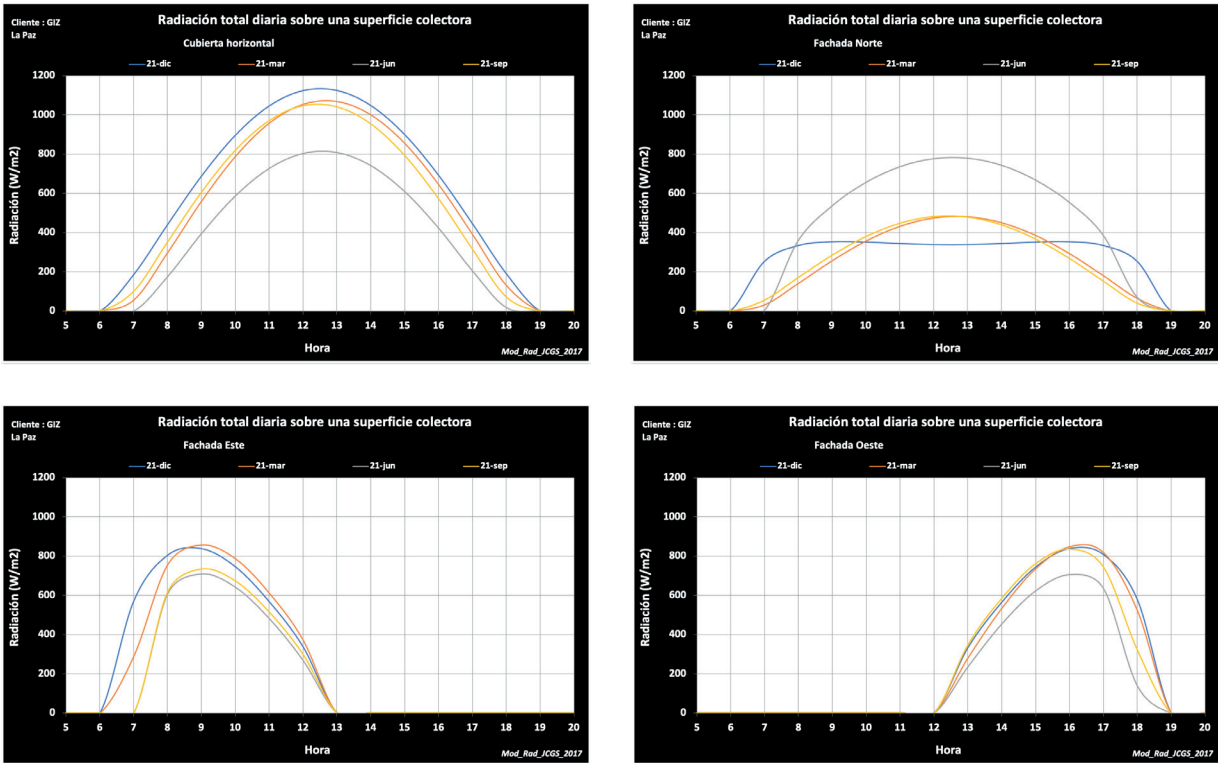
6.1.1 Variabilidad de la radiación solar y orientación de la edificación

La orientación de los muros y ventanas afecta sustancialmente la ganancia de calor de una edificación. Para ejemplificarlo, las siguientes

figuras muestran la radiación total incidente sobre una superficie con distintas orientaciones en la ciudad de La Paz.



Figura 16. Radiación total diaria sobre una superficie colectora



Fuente: Modelo de simulación de radiación (Guzmán, JC., 2017).

Podrá observarse que la radiación que incide sobre una superficie horizontal al mediodía de un día de verano, es 40% más alta que su similar en invierno, y 5% mayor a la que ocurre en otoño y primavera. Más allá de mostrar la importante variación estacional de la radiación sobre la superficie mencionada, las figuras muestran el potencial de la radiación como fuente de calefacción a lo largo del año.

Por otra parte, puede observarse también que esta radiación, en el verano, es 30% mayor que aquella que incide sobre las paredes verticales

6.1.2 Orientación de la vivienda

La orientación de una edificación es de alta relevancia para su desempeño energético. Permite regular la iluminación natural y la transferencia de calor a través de la envolvente térmica de la edificación.

Las cartas solares presentadas en la anterior sección en las gráficas de la Tabla 1, mostraban

orientadas al Este y al Oeste, y algo más de tres veces mayor a la que incide –a la misma hora– en un muro orientado hacia el Norte.

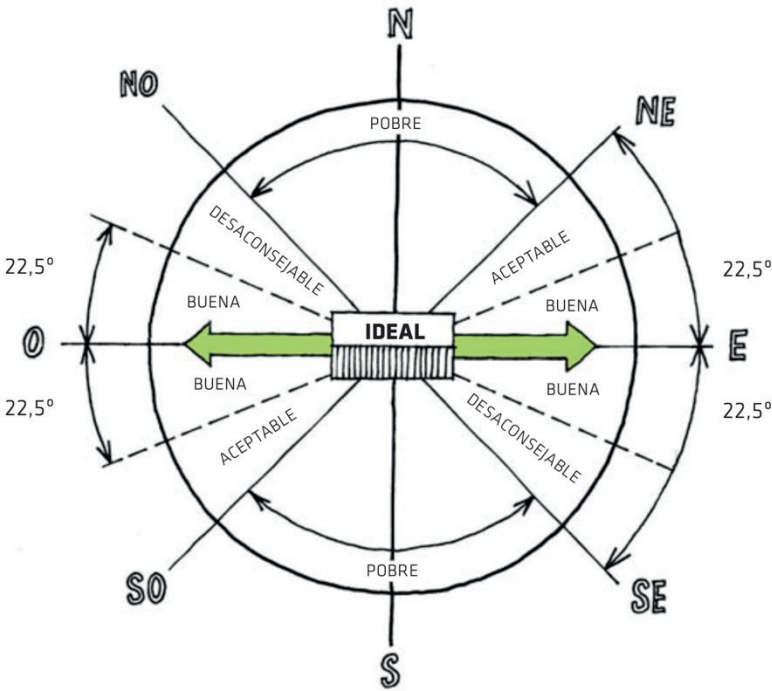
También puede evidenciarse la importancia de considerar el potencial de calefacción que ofrece la fachada Norte durante el invierno.

La observación cuidadosa de las figuras mostradas, ayudarán al lector a abordar de mejor manera las recomendaciones que se expondrán a lo largo de este capítulo.

que, en el hemisferio Sur, donde nos encontramos, el lado más soleado de la edificación será el lado Norte. Durante el verano el sol alcanzará el cenit e, incluso, asoleará momentáneamente el lado Sur de las edificaciones. En el invierno, a su vez, el ángulo de altitud solar es mucho menor a 90° y los aportes solares en el lado Norte serán dominantes.

La siguiente Figura –tomada del Manual de eficiencia energética para la vivienda social de Chile– nos muestra un diagrama de posibles orientaciones de la vivienda cuando el propósito es la calefacción.

Figura 17. Diagrama de recomendación de orientación



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile (2009).

En la Figura se puede observar que, si la edificación se encuentra en climas fríos como la región de tierras altas o algunas zonas frías de la región de tierras de valle, el criterio será tener el máximo acceso a la radiación solar en los períodos fríos del año. En este sentido, la mejor decisión será orientar el eje principal de la vivienda en la dirección Este-Oeste.

6.1.3 Captación, almacenamiento y protección solar

Como fue mencionado en secciones anteriores, la captación solar en la vivienda se realiza a través de los elementos transparentes y opacos de la envolvente. Naturalmente, las estrategias para aprovechar –o evitar– la radiación solar dependerán de la región biogeográfica en la que se encuentre situada la edificación.

Por ejemplo: en la zona biogeográfica templada de tierras altas (Sud Oeste potosino), será importante contar con estrategias de ganancia

Una situación opuesta ocurre en la región de tierras bajas: en ellas se buscará evitar la ganancia de calor por radiación solar. En tal sentido, será aconsejable orientar el eje principal de la edificación en la dirección Norte-Sur, reduciendo el asoleamiento lateral en el poniente, principalmente.

solar como fuente de calefacción natural de las edificaciones.

Por el contrario, en las zonas tropical, subtropical y templada de tierras bajas, será importante desarrollar estrategias de reducción de la influencia de la radiación sobre la edificación.

En períodos de frío, la captación solar debe ser máxima, mientras que en períodos de calor debe ser mínima.

6.1.3.1 Ventanas

En el caso de las superficies transparentes de la envolvente, como vidrios de puertas, vidrios de ventanas, claraboyas y tragaluces, la cantidad de radiación solar y calor transmitidos hacia el interior de la edificación estará determinada por el factor solar y por la ubicación de los elementos que se encuentran dentro de la edificación.

Debe asumirse, en principio, que la captación solar a través de ventanas es favorable en invierno o en regiones de climas fríos, y desfavorable en verano o en regiones con climas cálidos.

En tal sentido, la ubicación de las ventanas en la edificación, y la selección de su factor solar, dependerá de la zona biogeográfica en la que se diseña la edificación.

6.1.3.2 Cerramientos opacos

En el caso de los elementos opacos, la cantidad de radiación solar captada y su transmisión hacia el interior de la edificación estará determinada por las propiedades de los elementos opacos de la envolvente y por el nivel de sombra a que estará expuesta la vivienda.

En regiones climáticas frías, en las que se busca maximizar la ganancia de calor solar, se promoverá la construcción de muros de elevada absorbancia térmica –por ejemplo, superficies

6.1.3.3 Efecto invernadero y captación de calor

La ganancia de calor a través de superficies transparentes –una característica del diseño pasivo– se debe a que la radiación solar (en onda corta) que se transmite a través de los elementos transparentes de la envolvente, alcanza el interior de la vivienda incidiendo sobre elementos del edificio que absorben parte de la energía de esta radiación.

En efecto, si la edificación será construida en la región de tierras altas, los elementos transparentes serán importantes para captar la mayor cantidad de radiación solar en la época fría. La mayor superficie de ventanas, por tanto, deberá estar ubicada en las fachadas Norte y Oeste, los tragaluces deberán ubicarse en la cubierta Norte y, en ambos casos, se debe buscar implementos con un elevado factor solar.

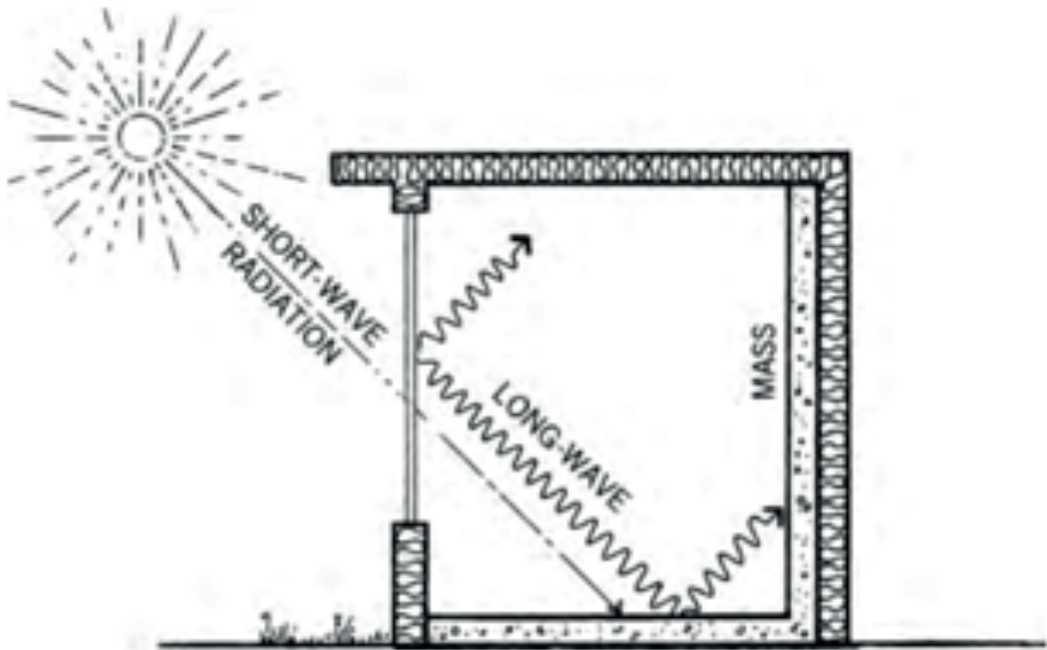
Si la edificación será construida en la región de tierras bajas, los elementos transparentes deberán ser de bajo factor solar, es decir, contener superficies reflexivas y disponer de protecciones externas como persianas o venecianas. La mayor superficie de estos elementos transparentes deberá estar ubicada en la fachada Sur y Este.

con colores absorbentes– y la exposición de las fachadas Norte y Oeste deberán construirse sin protecciones solares o aleros de gran dimensión.

En regiones climáticas calientes, en las que se busca minimizar las ganancias de calor solar a través de elementos opacos, se privilegiarán muros con reducida absorbancia térmica (superficies en la gama de los blancos) y protegidos de la radiación solar, principalmente en las zonas Este, Norte y Oeste de la edificación.

La energía absorbida por estos elementos –muebles, pisos y paredes–, se manifestará por medio de la elevación de su temperatura. Estos cuerpos calientes, a su vez, emitirán radiación de baja energía que quedará atrapada en el ambiente por el hecho de que el vidrio es opaco a la radiación de baja frecuencia (onda larga), generando entonces, un efecto invernadero porque el calor atrapado eleva la temperatura del ambiente.

Figura 18. El efecto invernadero capta y atrapa la radiación solar durante el día

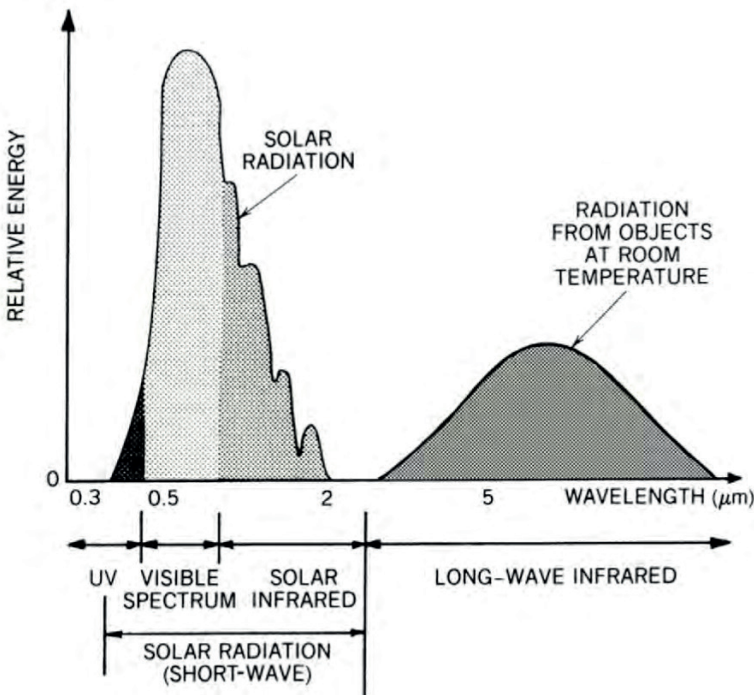


Fuente: Heating, cooling, lighting (Lechner, 2015).

La masa térmica (los cuerpos calentados por la radiación solar durante el día) entregará el calor almacenado al medio ambiente en la medida en que la temperatura de éste vaya disminuyendo.

Esta entrega de calor ocurrirá por radiación en onda larga, de los cuerpos calientes hacia otros objetos –como las paredes y el piso– más fríos.

Figura 19. Longitud de onda de radiación solar y emisión de cuerpos calentados



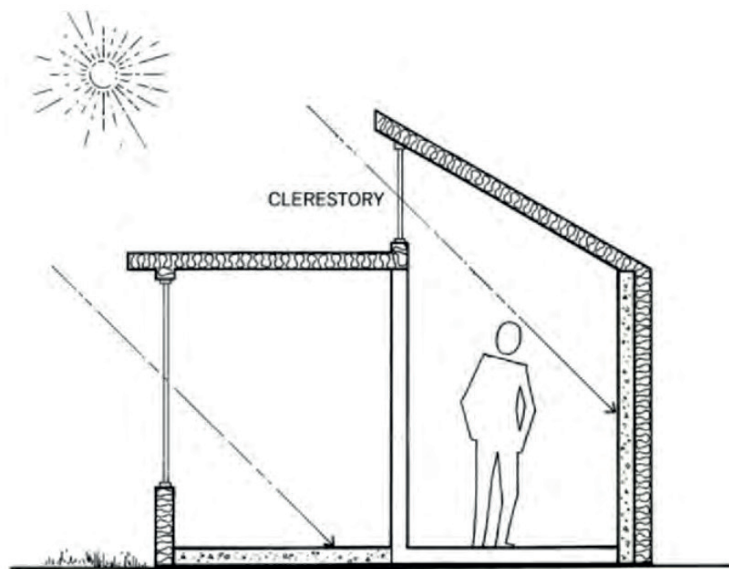
Fuente: Heating, cooling, lighting (Lechner, 2015).

La propiedad de almacenar y entregar calor por parte de la masa térmica dentro de la edificación, tiene la función de prevenir el sobrecalentamiento del ambiente durante el día, y la de almacenar calor para su uso durante la noche, previniendo un excesivo enfriamiento.

El fenómeno analizado permite aplicar estrategias diferenciadas según la región biogeográfica donde vaya a ser emplazada la edificación:

■ Por ejemplo, si la edificación será construida en la Región de Tierras Altas, en la que la temperatura media diaria está muy por debajo de la temperatura considerada de confort, una combinación adecuada de superficie transparente y masa térmica interna orientada al Norte, logrará un ambiente mucho más agradable.

Figura 20. Uso de tragaluces para incrementar el efecto invernadero



Fuente: Heating, cooling, lighting. Lechner. 2015.

■ Por el contrario, si la edificación será construida en la Región de Tierras Bajas, la captación y almacenamiento de calor lograrán sobrecalentar la edificación mucho más allá

de los límites de la zona de confort. Tener en cuenta este potencial problema nos induce a pensar en las estrategias de protección solar y de uso de la masa térmica.

6.1.3.4 Inercia térmica

La inercia térmica puede ser utilizada para calentar o enfriar una edificación. Se parte del principio de que los ambientes de una edificación que poseen una importante inercia térmica son más estables térmicamente.

Definamos la inercia térmica. La inercia térmica es la resistencia que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura. Esta dificultad tiene una vinculación directa con la acumulación

de energía: los cerramientos y ambientes con mucha inercia almacenan una mayor cantidad de energía.

Esta propiedad es muy útil en sitios donde el rango de temperaturas –el diferencial entre la máxima y mínima temperatura– es de gran magnitud. Esta situación se presenta en climas cálidos o fríos, áridos y secos.

Si la aplicación del concepto de inercia térmica es apropiada, se podrá observar que, aunque la temperatura exterior presenta oscilaciones significativas, la temperatura interior será estable y se encontrará en el rango de temperaturas de confort. El hecho es que la masa térmica reduce el rango de temperaturas absorbiendo calor en el día y liberándolo en la noche (Lechner, 2015:171).

En regiones cálidas y secas, como la Zona Biogeográfica 2 en Bolivia (RB2, Región Templada de Tierras Bajas), la más importante masa térmica para lograr el equilibrio térmico de la vivienda será el piso, debido a que éste recibe la mayor cantidad de radiación directa y, en la noche, un piso ligeramente caliente otorga una de las mejores sensaciones de confort.

En esta región, la masa térmica asociada a estrategias de protección solar permite amortiguar el incremento de la temperatura interior de la vivienda en el verano o en días muy soleados.

En regiones cálidas y húmedas, como la Zona Biogeográfica 1 en Bolivia (ZB1, Región Tropical de Tierras Bajas y Región Subtropical de Tierras Bajas), la masa térmica será muy útil para disminuir la temperatura interior de la edificación si ésta es acompañada de una estrategia de ventilación nocturna.

6.1.3.5 Protección solar

La protección solar y/o el crear espacios de sombra (dar o producir sombra: sombrear) es una estrategia pasiva para prevenir el sobrecalentamiento de la edificación, particularmente en el verano. Y ésta es, quizá, la estrategia más importante, debido a que casi todas las edificaciones del mundo se sobrecalientan en el verano y la respuesta más usual a este fenómeno es el uso intensivo de equipos de aire acondicionado, incrementando el consumo energético por unidad de superficie construida (Lechner, 2015: 234).

Pero, además, el uso de la masa térmica en zonas frías puede ser utilizado en la forma descrita en el ejemplo de la anterior sección, es decir, como un complemento constructivo para optimizar el efecto invernadero en la vivienda.

En ambos casos, la inercia térmica mitigará el efecto negativo de los cambios bruscos de temperatura en el exterior.

Aquí debe establecerse un concepto importante: La capacidad de almacenar energía de un material depende de su masa, su densidad y su calor específico. Los materiales ideales para constituir una buena masa térmica son aquellos que tienen elevado calor específico, alta densidad y baja conductividad térmica.

En este grupo de materiales citamos a los siguientes:

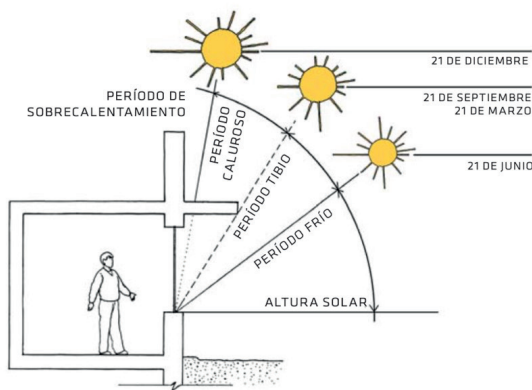
- paredes de adobe y bloques de tierra compacta o tapial;
- tierra compactada o tapial;
- rocas y piedras naturales; y
- hormigón simple o reforzado en zonas cálidas.

La Figura 16 anterior mostraba que, en un día de verano, una superficie acristalada horizontal capta mucha más radiación solar que una ventana vertical ubicada en las fachadas Este y Oeste. Se deducirá, por tanto, que este factor se multiplica varias veces cuando se la compara con una ventana en la fachada Sur de una edificación. La observación cuidadosa de la Figura referida permitirá plantear las estrategias de protección solar adecuadas.

Adicionalmente, se deduce que las estrategias de protección solar serán más útiles en las regiones cálidas para evitar el sobre-calentamiento de la edificación durante el verano.

Una primera estrategia de protección de las ventanas ubicadas en la fachada Norte será la colocación de aleros inclinados u horizontales sobre las ventanas. La Figura 21 muestra los criterios utilizados para el diseño de este elemento básico de protección solar.

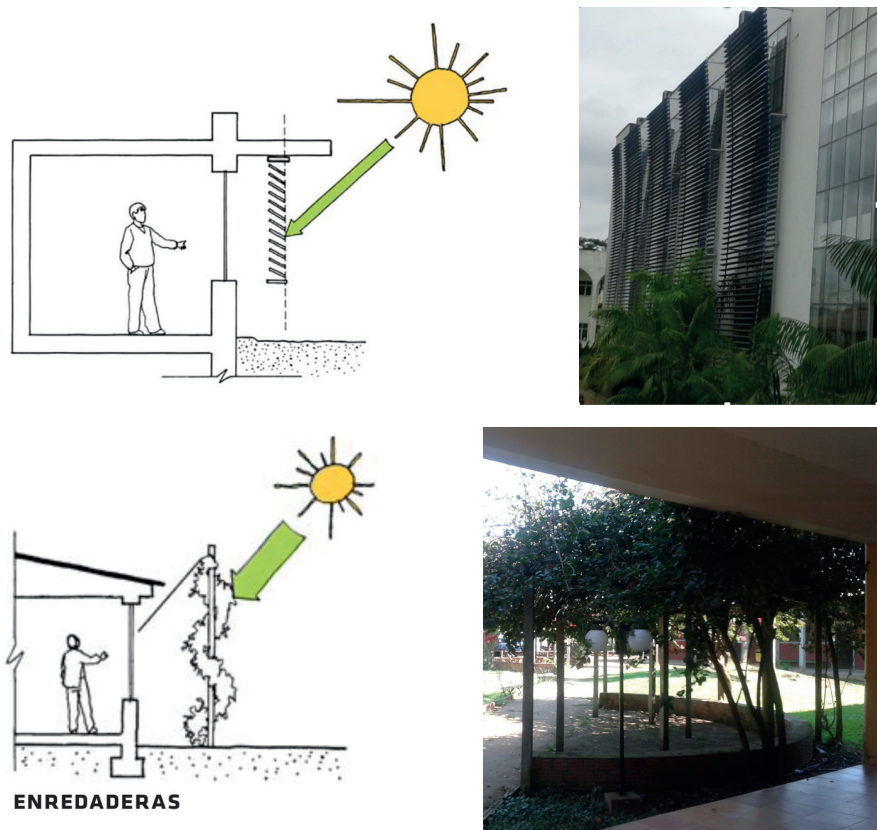
Figura 21. Alero fijo en orientación Norte



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile (2009).

Una segunda estrategia de protección solar recomendada para las ventanas instaladas en las fachadas Este y Oeste, es la instalación de persianas verticales (quiebra-vista) o parapetos de vegetación para reducir la incidencia de la radiación solar en las primeras horas de la mañana y en las últimas horas de la tarde.

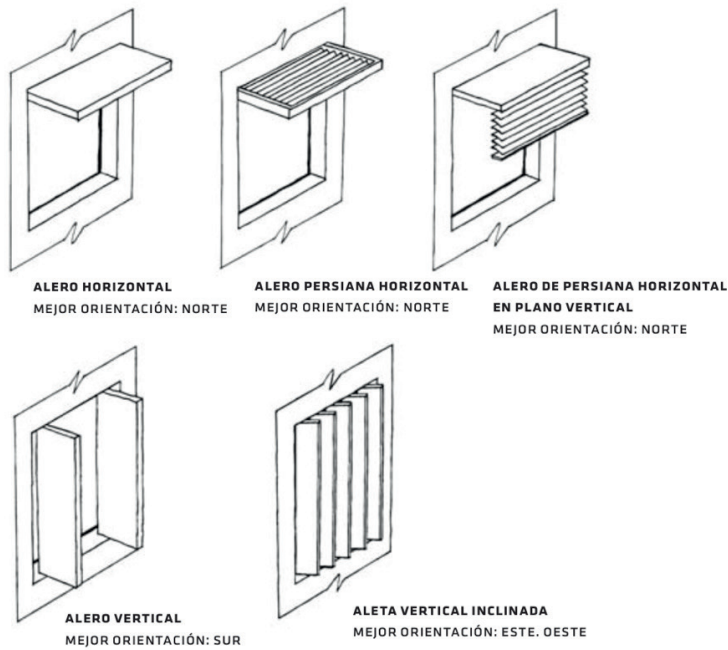
Figura 22. Protecciones solares verticales para orientación Este y Oeste



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile (2009). Fotografías de J.C. Guzmán (2015).

Los tipos básicos de protección presentados de protección solar, indicando la orientación más efectiva para su utilización. La Figura 23 presenta diversos tipos

Figura 23. Protección solar fija en ventanas para diferentes orientaciones.



Fuente: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social de Chile (2009).

Es recomendable también la protección solar en elementos opacos de la edificación para evitar sobrecalentamiento de los cerramientos. La protección solar en muros puede obtenerse con corredores cubiertos alrededor de la vivienda, sobre todo para fachadas Este-Norte-Oeste (Figura 24).

Figura 24. Fotografías de corredores cubiertos



Fuente: Elements of an Energy-Efficient House (DOE, 2000). Fotografía de J.C. Guzmán (2015).

6.2 Sistemas de aislamiento térmico en la envolvente

La especificación de los materiales constructivos es una decisión importante al momento de diseñar la edificación. La transmitancia térmica de los elementos opacos tiene, entre otras especificaciones, especial relevancia.

Como se ha señalado en secciones anteriores, su valor será determinante para definir el desempeño energético de la vivienda: elevados valores de transmitancia térmica favorecerán la transferencia de calor, es decir, ganancias de calor por conducción en climas cálidos y/o en el verano, y pérdidas de calor por conducción en climas fríos y/o en el invierno.

Por el contrario, reducidos valores de transmitancia térmica evitarán las ganancias de calor por conducción en climas cálidos y en el verano, y reducirán las pérdidas de calor por conducción en climas fríos y en el invierno.

Aunque no existen estudios en Bolivia que determinen el valor de transmitancia térmica de la envolvente para cada una de las regiones biogeográficas del territorio, se sabe que alcanzar valores establecidos por estándares internacionales con los materiales de construcción convencionales, requeriría elementos constructivos de gran espesor, elementos que serían muy pesados y que elevarían los costos de construcción hasta convertirlo en un proyecto en inviable.

Uno de los materiales que más influencia tiene sobre el desempeño energético de un elemento de la envolvente térmica es el aislamiento, pues su elevada resistencia térmica reduce la transferencia de calor entre el interior y exterior de la habitación, con reducido incremento en las solicitudes de resistencia estructural y asequibles económicamente.

Por otra parte, el aislamiento reduce la cantidad de energía necesaria para climatizar (calentar o refrigerar) una edificación. Esta reducción conlleva a reducir la capacidad requerida de las unidades de refrigeración o calefacción,

hecho que deviene en la reducción de los costos de inversión y en los costos operativos de la edificación.

De lo dicho hasta aquí se deriva que la instalación de aislantes en la envolvente térmica de una edificación puede ser la forma más efectiva y económica de alcanzar el confort térmico dentro de una edificación durante todo el año, entendiendo por económica aquella solución que combina los costos de inversión y los costos de operación futuros.

Los elementos constructivos implicados en esta importante selección, son aquellos que son parte –junto a las ventanas– de la envolvente térmica, es decir, los muros, la cubierta o techumbre, y el piso de la edificación.

Esta sección está dedicada a revisar los materiales aislantes que ayudarán a reducir la transmitancia térmica de los componentes de la envolvente térmica.

6.2.1 Muros

Tanto en climas cálidos como en climas fríos, los muros constituyen una parte importante de la superficie total de la envolvente térmica, es decir, de la superficie que intercambia calor con el medio ambiente exterior.

En la región de tierras altas los muros de elevada transmitancia permiten que el escaso calor almacenado en el interior de las edificaciones se transfiera hacia el exterior reduciendo la temperatura interior de la edificación.

En la región de tierras bajas, a su vez, estos muros permitirán una ganancia de calor no deseada, pues la edificación perderá el confort por exceso de calor.

Se mencionó en la sección anterior que materiales de construcción como el concreto y los ladrillos cerámicos pueden absorber y almacenar una importante cantidad de calor,

y que este calor sería posteriormente liberado cuando la temperatura del aire interno de la edificación disminuya. Este fenómeno, que es una combinación del efecto invernadero y de la inercia térmica, será aún más efectivo cuando los muros estén aislados en su parte exterior.

Otro efecto, como resultado de la aplicación de una estrategia de aislamiento en los muros, será que la temperatura de la superficie interior de la envolvente térmica se acercará a la temperatura de confort buscada (Díaz, 2011: 44).

En climas templados y cálidos, las paredes internas de mampostería (ladrillo hueco, bloque de concreto, revestimientos cerámicos) y las paredes de la envolvente, adecuadamente aisladas por fuera, ayudarán a moderar las temperaturas dentro de la edificación.

6.2.2 Techo

En las regiones de tierras altas, de climas fríos o en el invierno, una importante cantidad de calor asciende hacia el techo debido a su baja densidad y se pierde por conducción a través de éste.

En las regiones de tierras bajas o en el verano, las cubiertas no aisladas son importantes captoras de calor que es transferido –también por conducción– hacia el interior de la vivienda.

En ambos casos, la transferencia de calor a través del techo está íntimamente relacionada con la pérdida de confort por frío o exceso de calor, respectivamente.

Y aunque los materiales aislantes para la cubierta son muy similares a los que se utilizan en muros, es importante atender algunos detalles:

- Si el techo está compuesto por un material de cubierta (calamina, placa de fibrocemento, o teja cerámica) y un cielo raso, el material aislante se instalará –necesariamente– entre la placa de yeso y la cubierta. En tales casos se aconseja la instalación de un material aislante que no cambie sus propiedades (aislantes) en presencia de humedad.

- En los casos en que el techo contiene una cámara ventilada que separa la cubierta del cielo falso, el material aislante se colocará sobre el cielo falso. Las especificaciones para control de humedad, en este caso, son menores.

- Es recomendable, en ambos casos, la instalación de un material aislante provisto de una barrera de vapor, de polietileno -transparente, opaco o aluminizado- hacia el lado del cielo raso o el cielo falso, respectivamente.

6.2.3 Piso

Dadas las condiciones climáticas bolivianas, se podría decir que en casi la totalidad de los casos –salvo raras excepciones– la temperatura del interior del ambiente será superior a la temperatura del piso.

En las zonas frías, o en el invierno, la diferencial de temperatura entre el aire del ambiente interior y el piso será reducida y podría llegar a ser mínima. Por el contrario, en las zonas cálidas y en el verano, esta diferencial puede alcanzar valores máximos.

En ambos casos, el piso constituye un mecanismo importante de extracción de calor de la edificación.

En climas templados y cálidos, los pisos de baldosas de concreto y los revestimientos de cerámica ayudan a moderar las temperaturas dentro de la edificación. Reducir su resistencia térmica, utilizando aislantes o alfombras, proporcionará una sensación de confort al caminar, pero reducirá en gran medida su efectividad para almacenar y liberar calor. Esto nos lleva a concluir que el uso de aislantes de piso en las zonas cálidas debe ser cuidadosamente evaluado.

No es el caso de los climas fríos existentes en la región de tierras altas: el piso es un mecanismo de extracción de calor muy por debajo de la temperatura mínima de confort, por tanto, es importante considerar su aislamiento al momento de diseñar la edificación.

Una práctica muy común en Bolivia es la construcción de pisos no ventilados cuya fundación está compuesta por una losa de concreto armado o simple sobre un contra-piso de piedra o tierra compacta.

Sin realizar cambios sustanciales en la práctica constructiva del país, se sugiere a los diseñadores considerar la siguiente Tabla al momento de diseñar el piso de una edificación.

Tabla 11. Sistemas constructivos de piso según tipo de clima

Elemento constructivo	Clima				
	Muy frío	Frío	Templado	Caliente	Muy Caliente
Piso de tierra compacta	+	+	+	+	+
Contrapiso de piedra	+	+	+	+	+
Losa de concreto simple o armado	+	+	+	+	+
Aislante rígido	+	+	+		
Listones y cámara de aire	+				
Tablero aglomerado	+				
Piso de cerámica/madera	+	+	+	+	+

Fuente: Modelación térmica de sistemas constructivos (Guzmán, JC., 2018).

6.2.4 Materiales aislantes utilizados

Los materiales aislantes que se encuentran en el mercado son variados, no sólo en su resistencia térmica sino, también, en su facilidad de instalación, su grado de no-inflamabilidad, densidad, emisividad, etcétera. Cuando se escojan materiales aislantes será importante considerar los siguientes aspectos:

6.2.4.1 Aislantes sintéticos

En este grupo se encuentra aislantes como la espuma de poliuretano y poliestireno. Aunque su conductividad térmica es una propiedad muy favorable debido a su baja densidad, debe tomarse en cuenta que estos materiales se derivan de la industria química del cloro y del petróleo mediante procesos que utilizan mucha energía.

Estos aislantes se caracterizan, además, por contener sustancias como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), que se encuentran en el grupo de sustancias que agotan la capa de ozono y liberar gases venenosos en caso de incendio (Sielfeld, R. 2021)

6.2.4.2 Lanass minerales

Estos aislantes proceden de rocas volcánicas y arena procesadas industrialmente. Presentan varias ventajas: elevada facilidad de instalación, son de bajo costo, de fácil disposición como material inerte, no inflamables, y se venden en varias presentaciones: bloques, rollos y pelets.

6.2.4.3 Aislantes ecológicos

Uno de los principales es la celulosa. Material de elevada resistencia térmica que ha sido considerado largamente como un material inflamable, característica que es reducida cuando es adecuadamente

tratado. Es de fácil instalación, pues se vende como mantas, láminas pre-formadas y relleno suelto.

Se debieran incluir en este grupo de aislantes a la paja y otras fibras vegetales utilizadas como soporte estructural de aglomerantes pero que, al mismo tiempo, cumplen funciones de aislamiento. Sus propiedades térmicas aún no están estudiadas en Bolivia.

6.2.4.4. Materiales compuestos

En la actualidad existe una serie de materiales que están compuestos por varias capas yuxtapuestas. Estos materiales contienen algunas capas de material aislante y, frecuentemente, están cubiertos por placas de yeso y/o papel de aluminio.

Se presenta a continuación una tabla con algunas posibles soluciones de aislamiento a instalarse en una edificación.

Tabla 12. Principales propiedades de materiales aislantes

Tipo		Material [kg/m³]	Densidad	Conductividad térmica	Resistencia aplastamiento	Inflamabilidad
			[W/mK]	[kg/cm₂]		
Mineral	MW	Lana de roca	150 - 175	0,045	0,7 - 1,3	+
	GW	Lana de vidrio	13 - 60	0,045	0,2	+
	CG	Vidrio celular	120 - 135	0,055	7 - 16	+
	EPB	Perlita expandida	170	0,060	3,5	+
Sintético	PURO	Poliuretano	30	0,035	1,2	-
	PIR	Poliisocianurato	30	0,035	1,2	+
	PF	Espuma fenólica	40	0,045	1,2	+
	EPS	Poliestireno expandido	15 - 40	0,045	0,7 - 3,5	-
	XPS	Poliestireno extruido	32 - 45	0,040	3 - 7	-
Vegetal	ICB	Corcho	100 - 120	0,050	-	+
Reflectantes delgados	PMR	Multicapa: Aluminio + espuma plástica + polietileno	70	0,050	-	+

Fuente: Eficiencia energética en edificios (Sielfeld, R., 2021).

7

Renovación de aire, ventilación y control de filtraciones

Después de las estrategias de aprovechamiento de la radiación solar, la ventilación natural y el control de filtraciones es una estrategia bioclimática de la más alta relevancia.

La ventilación será útil en las regiones de clima cálido, como la región de tierras bajas en Bolivia, para refrescar las edificaciones durante el día.

En las zonas de clima frío, como la región de tierras altas de Bolivia, el control de las filtraciones de aire es de vital importancia: las edificaciones pierden aire caliente a través de orificios en las partes altas de la edificación, y los volúmenes de aire caliente perdidos serán reemplazados por aire frío que ingresa por orificios ubicados en las zonas inferiores de la edificación.

Volviendo a las zonas de clima cálido, es sabido que las infiltraciones provocarán intercambio de aire con el exterior, de forma que el aire climatizado interior será sustituido por el aire

caliente del exterior, incrementando el uso de energía para la climatización.

Por otra parte, cualquiera sea el clima, es claro que una edificación requiere ser ventilada para mantener la calidad del aire y controlar la humedad.

En esta sección realizaremos una aproximación a las estrategias de ventilación de una edificación, estrategias que cumplan con los requisitos de renovación de aire y –al mismo tiempo– reduzcan los consumos energéticos de climatización.

7.1 Requerimientos de ventilación y renovación de aire

Por todo lo señalado hasta aquí, se puede deducir que una envolvente térmica que sea hermética y aislante es ideal para cualquier edificación. Es la configuración de diseño hacia la cual tiende la arquitectura moderna (Clark II. 1998:35).

Sin embargo, una envolvente térmica completamente hermética presenta algunas limitaciones que es importante considerar al momento de diseñar la edificación.

Habíamos mencionado tangencialmente, en la sección dedicada al confort térmico en la vivienda, que la actividad metabólica humana requiere oxígeno para realizarse y que, como producto de la reacción metabólica dentro del cuerpo, se generan calor residual y dióxido de carbono, este último liberado por el mecanismo respiratorio (exhalaciones).

Por todo ello es que la presencia humana dentro de una edificación completamente hermética producirá dos efectos: utilizará el oxígeno contenido en el aire de la habitación e irá llenando de dióxido de carbono la habitación. Transcurridos unos minutos, se generará una situación de pérdida de la situación de confort, es decir, los habitantes de la edificación experimentarán una sensación de malestar por “falta de aire”.

Esta situación es aún más complicada cuando en el interior de la edificación operan equipos de calefacción y cocción de alimentos que utilizan combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, los que, directamente, tienen como un residuo principal el dióxido de carbono y –no pocas veces– el venenoso monóxido de carbono.

7.2 Definiciones preliminares

En términos precisos, la ventilación es la introducción intencionada de aire desde el exterior hacia el interior de una edificación. Se conocen dos tipos de ventilación: la natural, que es el flujo de aire a través de ventanas, puertas y otras aberturas planificadas en la envolvente térmica, y la mecánica, o ventilación forzada, que cumple el mismo propósito utilizando ventiladores, ductos y chimeneas. Las filtraciones de aire son flujos de aire a través de orificios, rajaduras y otros tipos de aberturas no planificadas en la envolvente térmica (ASHRAE, 2017: 16.1).

Dos conceptos de importancia deben tomarse en cuenta, antes de seguir adelante:

- El primero tiene que ver con el origen del movimiento del aire a través de la envolvente, sea en forma de ventilación natural o filtraciones: este movimiento se debe a la

diferencial de presión entre el exterior e interior del edificio.

- Esta diferencial de presiones varía a lo largo del día y es una función relacionada con los cambios de temperatura y la velocidad del viento.
- La presión que el viento ejerce sobre una edificación no solamente tiene relación con las solicitaciones estructurales sobre la edificación, sino también con los volúmenes de ventilación y la tasa de filtraciones.
- El segundo concepto se refiere a la tasa de cambio de aire de una edificación; es una tasa que relaciona el caudal volumétrico que ingresa/sale de la edificación con su volumen interior, y se mide, usualmente, en unidades de 1/h. A dicha tasa se la conoce como la cantidad de cambios de aire por hora (ACH, por sus siglas en inglés).

7.3 Necesidad de cambio de aire

Los requerimientos de ventilación para mantener una aceptable calidad del aire dentro de una edificación fueron largamente debatidos y han generado diferentes justificaciones y estándares (Grimsrud & Trinchán, 1989).

Las principales consideraciones para establecer un estándar de ACH tienen que ver con el control de la humedad, la concentración de dióxido de carbono, la eliminación de olores, etcétera. Se

establecen así tasas mínimas de renovación de aire en función del número de ocupantes o la superficie horizontal interior de la edificación.

La tabla a continuación muestra valores estandarizados de ventilación sugeridos por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés)-

Tabla 13. Requerimientos de aire de ventilación

Aplicación	Flujo de aire	Notas
Flujo de salida continuo		
Cocina cerrada	5 ach	Con base en el volumen de la cocina
Dormitorios	10 l/s	> 2 ach
Flujo de salida intermitente		
Cocina	25 l/s	Con campana extractora ventilada
	150 l/s	Con otro tipo de extractor.
Dormitorios	25 l/s	>2 ach
Requerimiento total de aire		
Basado en el área		0,15 l/s por m² de piso
Basado en la ocupación		3,5 l/s por persona.

Fuente: ASHRAE, Fundamentals. 2017.

Por otra parte, Rivero (1985) sugirió valores de ventilación mínima necesaria bajo criterios similares, pero estrictamente aplicados a regiones de clima cálido y húmedo en Brasil.

Tabla 14. Ventilación mínima necesaria en ambientes (Rivero, 1985)

Espacio disponible por persona [m³]	Aire fresco requerido por persona [m³/h]		
	Mínimo	Valores recomendables	
		Sin fumar	Fumando
3	40,7	61,2	81,4
6	25,6	38,5	51,1
9	18,7	28,1	37,4
12	14,4	21,6	28,8

Fuente: Eficiencia energética en la arquitectura (Lamberts et al., 2012).

7.4 Estrategias de ventilación y control

Al momento de diseñar una edificación, debe tomarse en cuenta –también– que una edificación muy bien aislada no podrá detener

la ganancia o pérdida de calor, sino solamente reducirla y ralentizarla.

7.4.1. Ventilación Natural

La ventilación natural en una edificación está íntimamente relacionada con su orientación y su ubicación en el terreno.

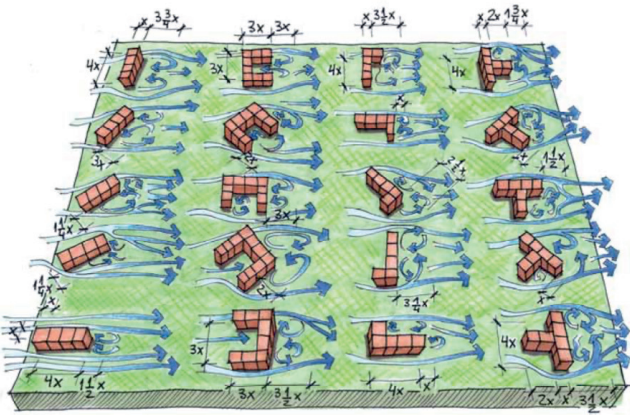
Al momento de diseñar una edificación será imprescindible estudiar la magnitud y dirección de los vientos predominantes, la época del año en que éstos ocurren, y anticipar la potencial ganancia o deterioro del confort higrotérmico al interior de la edificación diseñada.

La figura siguiente, tomada de Eficiencia energética na arquitectura del ingeniero brasileño Roberto Lamberts y otros autores, nos muestra el flujo de los vientos alrededor de las edificaciones y su afectación en barlovento (de donde viene el viento) y sotavento (a dónde va el viento).

Por ejemplo, en la región de tierras bajas, la orientación de la edificación buscará aprovechar el viento predominante para ventilarla e, incluso, refrigerarla con ventilación nocturna.

Por el contrario, en la región de tierras altas, se tendrá cuidado al momento de proyectar o instalar ventanas y puertas en la dirección de vientos predominantes, pues la presión del viento sobre la estructura de la vivienda incrementará las infiltraciones de aire frío.

Figura 25. Flujo del viento alrededor de las edificaciones

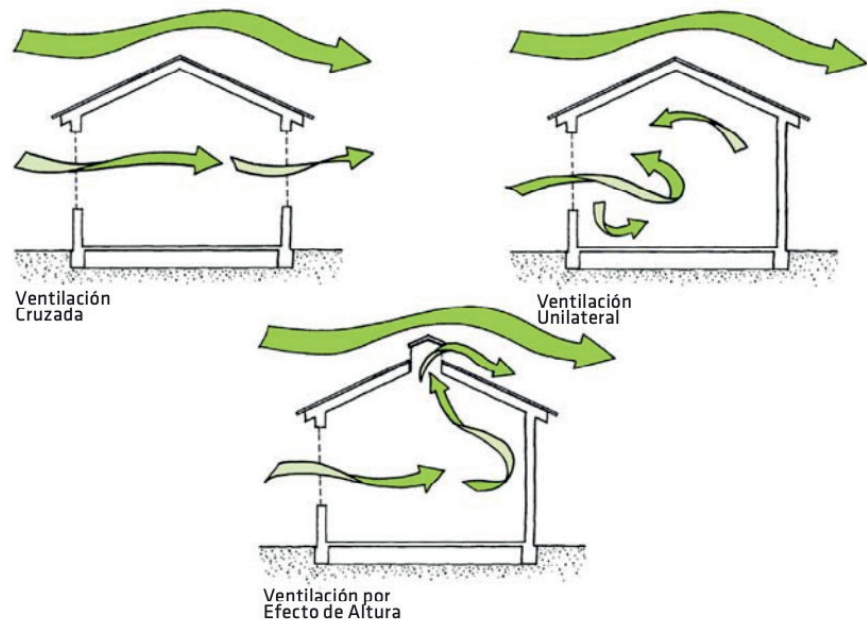


Fuente: Eficiencia energética na arquitectura (Lamberts, et al., 2012).

La ventilación de tipo natural en una edificación puede ser cruzada, cuando ocurre entre la fachada y su opuesta; unilateral, cuando el aire ingresa y sale de una habitación por la misma

abertura; y es también natural por efecto de la diferencia de alturas dentro de la edificación (Guía de diseño de la vivienda social de Chile: 81)

Figura 26. Tipos de ventilación natural



Fuente: Guía de diseño de la vivienda social de Chile (2009).

7.4.1.1 Ventilación de entretechos

Un fenómeno muy común en la región de tierras bajas es el sobre-calentamiento del aire contenido entre la cubierta y el cielo raso o cielo falso de un techo. La experiencia práctica ha mostrado que la cámara de aire del techo podría alcanzar, fácilmente el orden de 70°C. El origen de este fenómeno es la cantidad de calor almacenada por la cubierta debido a la radiación solar.

El calor contenido en el aire del entretecho se irradia hacia el cielo raso/falso convirtiéndolo en una estufa y afectando el confort de la edificación o demandando un funcionamiento intensivo de los equipos de aire acondicionado.

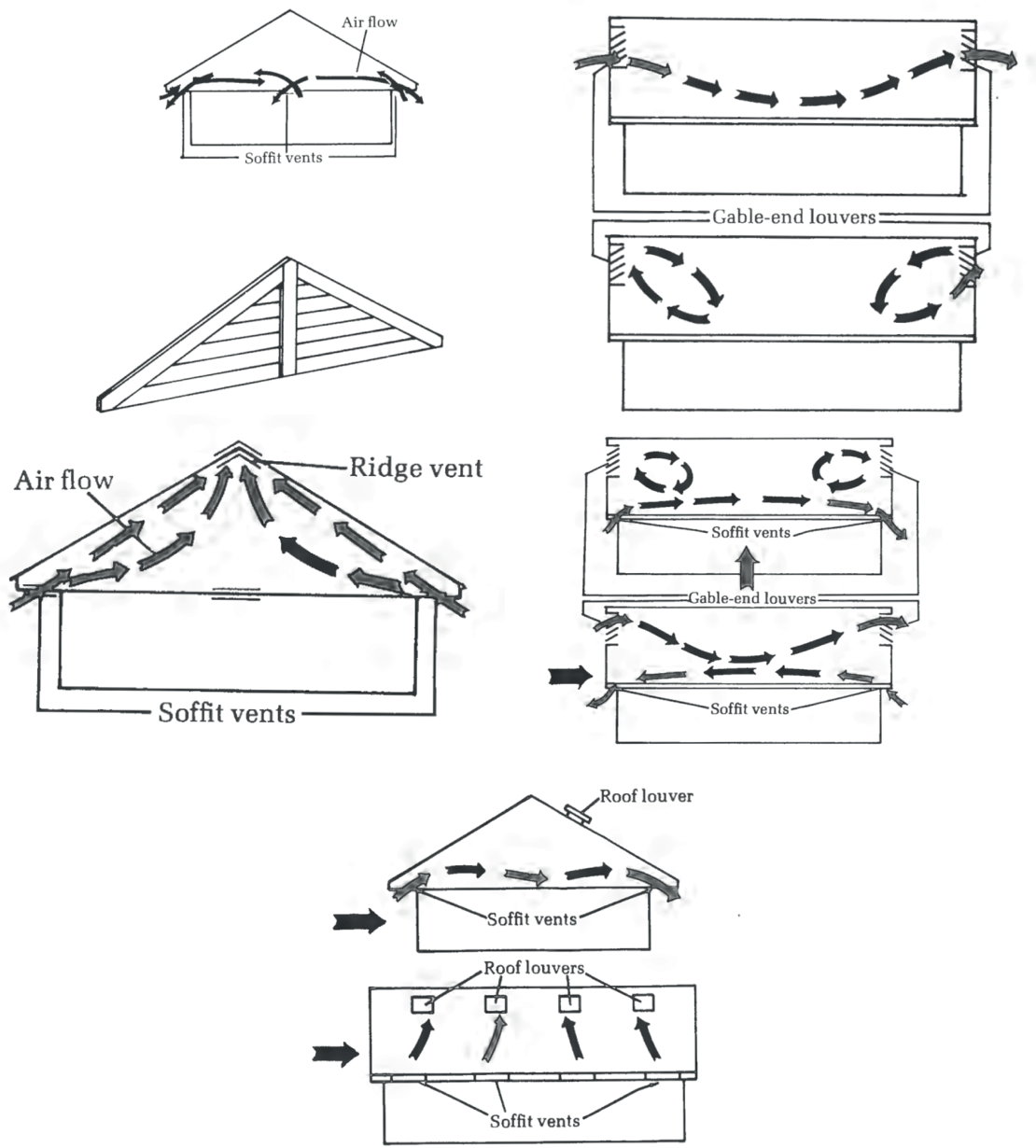
En las regiones de tierras altas, en cambio, es muy probable que un entretecho no ventilado provoque condensación humedeciendo el cielo raso/falso, las paredes internas y la estructura

del techo. Este fenómeno no solamente reduce la eficacia de los aislantes, si los hubiera, sino que a la larga terminará deteriorando los mismos materiales. El diseñador deberá tomar en cuenta que este indeseable efecto es mayor en el entretecho de la cocina y el baño, debido al contenido de humedad del aire del medio ambiente en dichas habitaciones.

La solución a esos problemas, tanto para el exceso de calor en la región de tierras bajas como para la condensación en las zonas frías, es ventilar el entretecho o los áticos, si éstos existieran en la edificación.

Las figuras a continuación, que muestran estrategias de ventilación natural de los entretechos, han sido tomadas del manual de Reducción de costos en calefacción y refrigeración de Peter Jones (Jones, 1979: 47)

Figura 27. Esquemas de ventilación de entretecho



Fuente: How to cut heating and cooling costs (Jones, 1979)

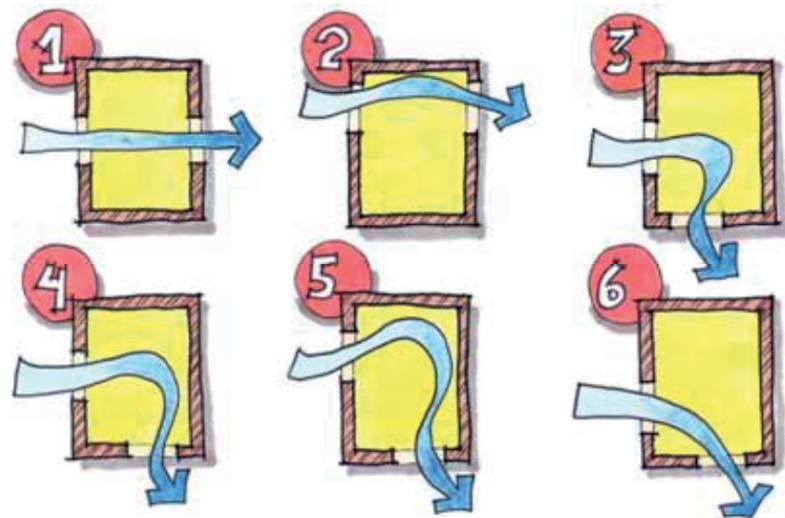
7.4.1.2 Ventilación cruzada

En este caso, se trata de las técnicas más conocidas y eficaces para la renovación de aire y mantenimiento del confort térmico de una edificación.

Se requiere, básicamente, de dos aberturas en paredes diferentes y algún conocimiento de la magnitud y dirección de los vientos predominantes (Lamberts, et al., 2012: 185).

Las figuras a continuación muestran el resultado de un estudio de simulación en realizado en un túnel de viento por Evans y Shiller, en 1988. Las primeras figuras (1 y 2) permiten mayores velocidades de viento; los esquemas 3, 4 y 5 son más efectivos para ventilar una mayor superficie de ambientes, más aún si se puede controlar la abertura de ventanas para modular la presión al interior del ambiente. El esquema 6, finalmente, muestra la pérdida de eficacia de la ventilación.

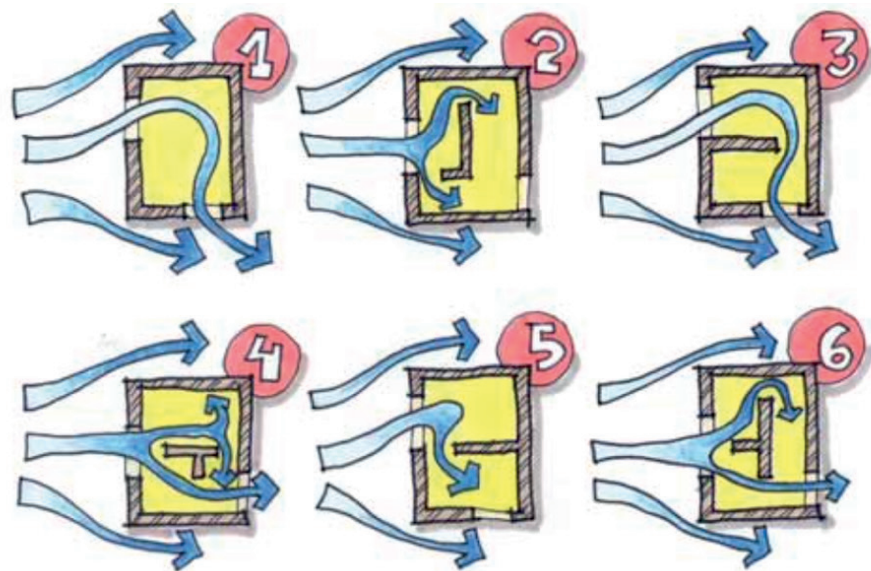
Figura 28. Ventilación cruzada



Fuente: Evans & Shiller (1988).

Las figuras siguientes, tomadas de la ya mencionada Eficiencia energética na arquitetura, de Lamberts y otros autores, presentan los flujos a través de un ambiente cuando existen paredes divisorias al interior de la edificación.

Figura 29. Ventilación cruzada - ambientes con variadas configuraciones



Fuente: Eficiencia energética na arquitetura (Lamberts, et al. 2012)

Lo que nos muestran las figuras precedentes es que se debe considerar la distribución interna de las habitaciones, y las puertas y ventanas al planificar una buena ventilación cruzada. Esto permite que la brisa natural fluya sin obstáculos para brindar un efecto refrescante en climas cálidos y húmedos.

7.4.1.3 Limitaciones de la ventilación

El refrescamiento de las edificaciones con ventilación natural será efectivo hasta una temperatura ambiente máxima del orden de 30 °C, pues la ventilación con aire a mayor temperatura se convierte en una fuente de

calefacción que sobre-calentará la edificación (Lamberts, et al., 2012: 173). En tales casos es más bien conveniente controlar las infiltraciones de aire excesivamente caliente.

7.4.2 Ventilación nocturna

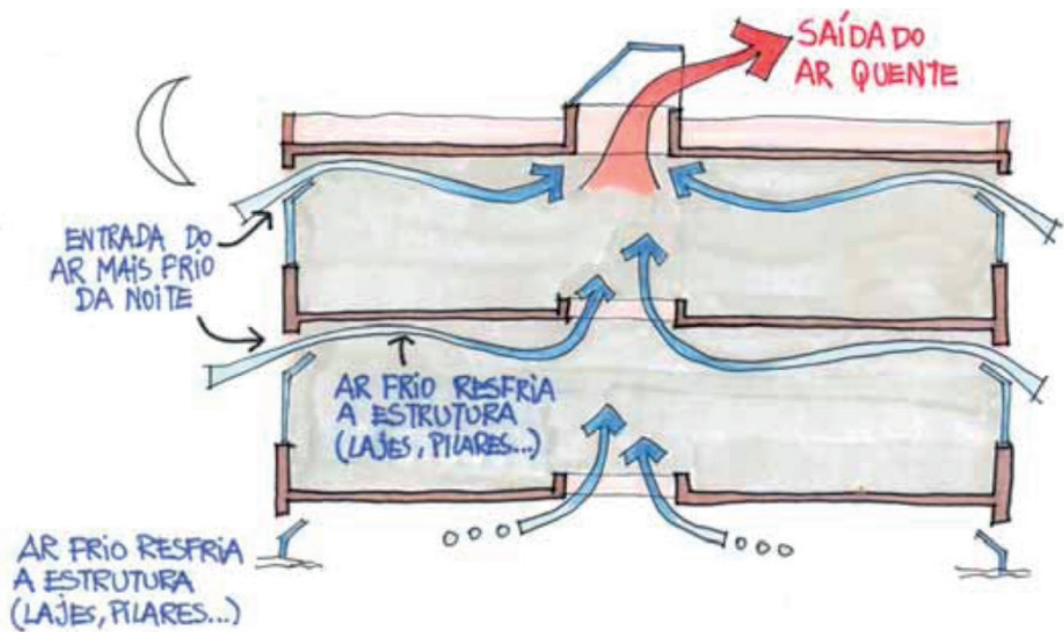
La ventilación nocturna es empleada para reducir la temperatura interna de la edificación durante la noche y el amanecer, aprovechando que la temperatura del medio ambiente exterior es – generalmente– inferior a la temperatura interior de la edificación. Se dice generalmente, porque tal situación no necesariamente se cumple en los climas muy húmedos.

elementos de gran masa térmica, por ejemplo, los muros de adobe, ayudarán a mantener fresca una edificación al día siguiente, cuando la temperatura exterior sea muy elevada, pues la masa pre-enfriada actuará como buen disipador de calor al absorber el calor que la edificación irá ganando.

El objetivo de la ventilación nocturna es refrigerar la estructura interna de la edificación, es decir, muros, pisos, muebles y otros elementos con masa térmica. Se entiende que refrigerar

El esquema a continuación muestra el funcionamiento del mecanismo, advirtiendo que éste puede ser alcanzado tanto con ventilación natural como con ventilación mecánica controlada.

Figura 30. Mecanismo de ventilación nocturna



Fuente: Eficiencia energética na arquitetura (Lamberts, et al., 2012)

Esta estrategia de enfriamiento funciona mejor en climas cálidos y secos debido a los amplios rangos de temperatura diaria durante el día. Un amplio rango de temperatura implica

temperaturas nocturnas frescas, aunque las temperaturas diurnas hayan sido bastante elevadas.

7.4.3 Ventilación mecánica

Los conceptos expuestos para la ventilación natural y ventilación nocturna son aplicables a la ventilación mecánica que utiliza ventiladores.

Es importante, sin embargo, realizar dos adiciones de importancia:

- El diseño con estilo de planta abierta, reduciendo las divisiones entre sala de estar, comedor y cocina, techos altos y ventilados, incluso con ventiladores de techo, son ideales para climas cálidos como en la región de tierras bajas (Energy efficient Home design, Gobierno de Queensland, Estado de Australia).

- Se aconseja el uso de ventiladores de recuperación de calor (HRV) o los ventiladores de recuperación de energía (ERV) para la ventilación controlada en hogares herméticos.

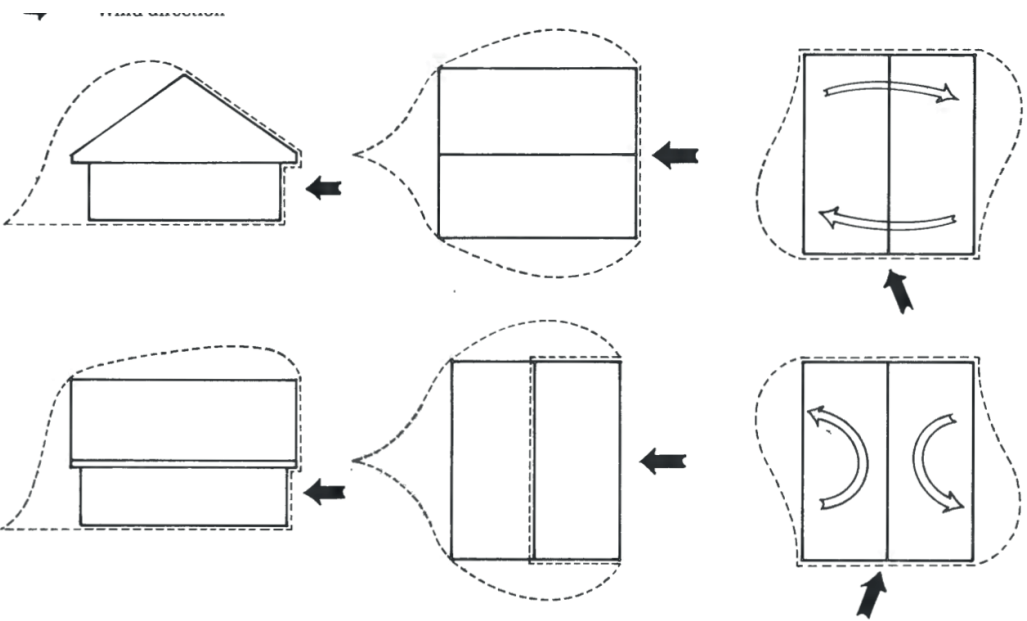
Estos ventiladores pueden recuperar alrededor del 70 por ciento de la energía del aire contaminado que se expulsa de la edificación y transferir esa energía al aire fresco que ingresa a través de un intercambiador de calor dentro del dispositivo. Podrían conectarse al sistema de aire forzado central –si éste existe– o pueden tener su propio sistema de conductos.

7.4.4 Hermeticidad y control de infiltraciones

Los cerramientos externos de una edificación cuya línea normal se encuentra orientada en la dirección de los vientos predominantes en un determinado sitio de emplazamiento, experimentan las mayores ganancias y pérdidas de calor por filtración de aire.

Un flujo de aire que impacta en el cerramiento de una edificación genera una diferencial de presión positiva -respecto al interior- proporcional a su velocidad. Instantes después, el viento rodeará la edificación por los lados y la parte superior, creando una diferencial de presión opuesta a la anterior.

Figura 31. Acción del viento sobre la edificación



Fuente: How to cut heating and cooling costs (Jones, 1979)

Establecer la dirección del viento respecto a la edificación no sólo es útil para definir la especificación de sus cerramientos y aberturas -desde la perspectiva de la acción del viento sobre éstos-, sino que ayuda a anticipar el mecanismo de ganancia y pérdida de calor por filtraciones de aire.

En la parte por donde llega el viento -barlovento- la diferencial de presiones será positiva, provocando infiltraciones de aire caliente o frío, y generando ganancia de calor o pérdida de éste, respectivamente.

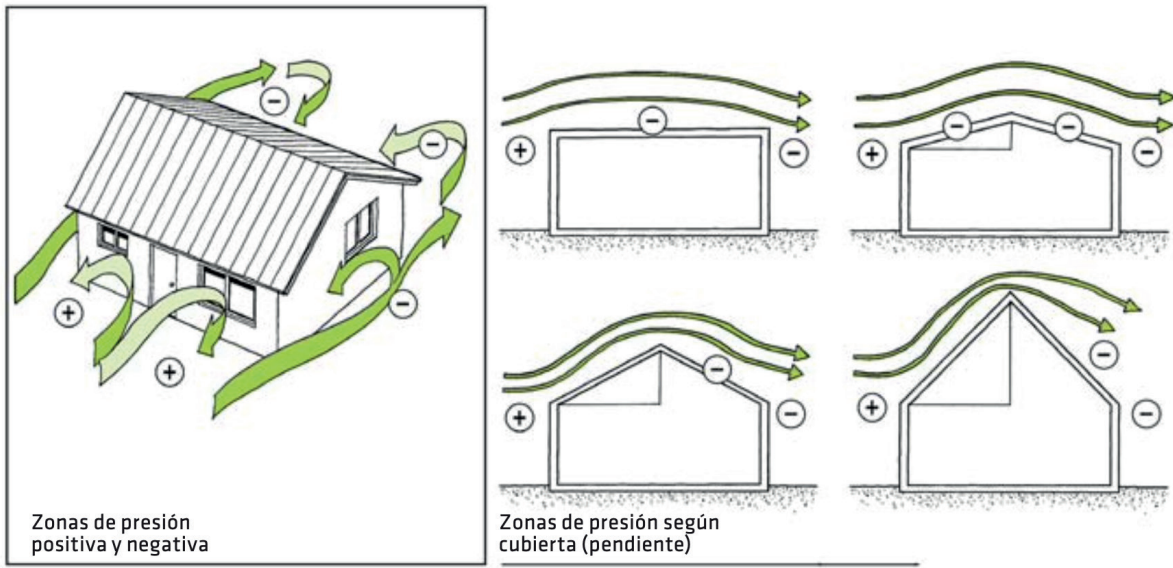
En la parte opuesta -sotavento- la diferencial de presiones será negativa y generará un efecto

de succión que facilitará filtraciones desde el interior de la edificación hacia el exterior. En este caso, la pérdida de aire interior climatizado (refrigerado o calentado) supone la pérdida del trabajo realizado por los equipos de climatización y el costo correspondiente.

Finalmente, las filtraciones de aire hacia el exterior en el lado de sotavento se complementan -y refuerzan- con las infiltraciones en barlovento y constituyen un importante mecanismo de transferencia de calor.

La figura a continuación muestra varios esquemas de la acción de viento sobre una edificación.

Figura 32. Flujo de aire y presiones sobre la edificación.



Fuente: Eficiencia energética en la vivienda social de Chile.

7.4.4.1 Efecto chimenea

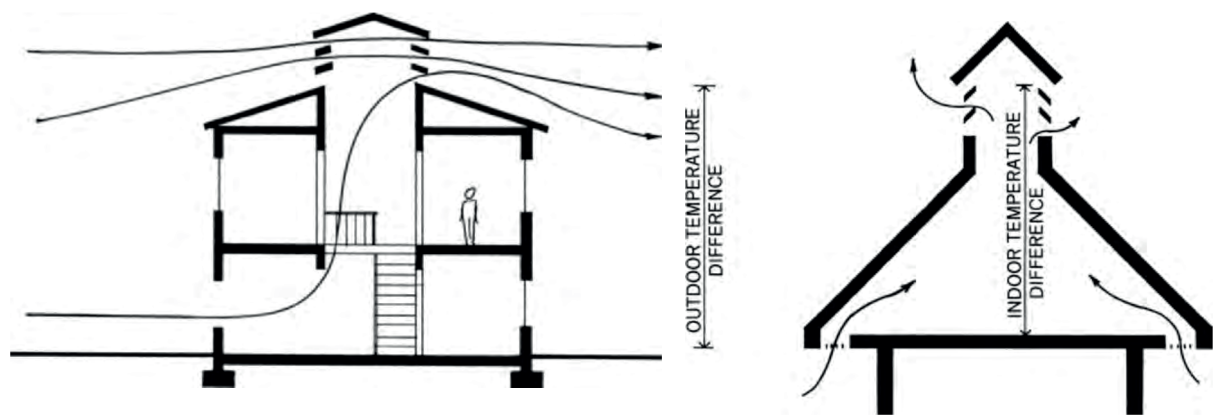
El denominado efecto chimenea es un mecanismo de convección natural que asociado a las diferenciales de presión y temperatura incrementarán las probabilidades de que una edificación intercambie calor por filtraciones de aire.

El efecto chimenea ayudará a expulsar aire de la edificación cuando la diferencia de temperatura interior entre dos aberturas verticales es mayor que la diferencia de temperatura exterior entre las mismas dos aberturas.

Este efecto -básicamente débil- podría ser acrecentado si las aberturas son más grandes; si en la abertura inferior existe presión positiva (el orificio se encuentra en el lado de barlovento) y en la abertura superior existe succión (la abertura superior se encuentra en sotavento).

La figura 33 a continuación muestra, esquemáticamente, el fenómeno mencionado.

Figura 33. Esquemas del efecto chimenea en la edificación.



Fuente: Heating, cooling, lighting. Lechner. 2015.

7.4.4.2 Hermeticidad

La hermeticidad de una edificación es un requisito importante para mejorar su eficiencia energética. Además, es inseparable de las medidas de diseño pasivo analizadas anteriormente: ¿qué sentido tendría ganar en confort de la vivienda con estrategias de captación, almacenamiento, aislamiento, si la energía se perderá por las rendijas y juntas de la construcción? (Berger, W. 2011:91)

Peor aún, la pérdida de eficiencia de una edificación cuyo confort es controlado por climatización controlada, será mayor cuando ésta tenga pérdidas o ganancias de calor por infiltraciones de aire no controlado y filtraciones de aire climatizado.

El Estándar Passivhaus de Madrid menciona algunas zonas típicas de la edificación que pueden presentar problemas de estanqueidad, a saber:

- La unión de las paredes con las estructuras de madera de piso o techo.
- La unión de las ventanas y marcos de ventanas y puertas.
- La unión de los muros y las instalaciones en la cubierta.

- La unión entre los componentes de las instalaciones (agua, electricidad, etcétera.) y los cerramientos de la envolvente.

- Las juntas de ventanas y puertas.

Las recomendaciones pasan, en general, por la colocación de sellos diversos en los sitios por los que suceden las filtraciones de aire. En todos los casos, la reducción de las corrientes de aire no deseadas al sellar las fugas de aire reduce los requisitos de calefacción en invierno y evita que el ingreso de aire caliente durante el verano.

Veamos algunas de ellas:

- Utilizar burletes para sellar cualquier espacio alrededor de puertas y ventanas. El mercado ofrece una diversidad de burletes sintéticos, de fieltro, con aislante, con reverso adhesivo, etcétera.
- También se puede utilizar espuma con respaldo adhesivo sensible a la presión, con/sin capa de aluminio.
- Sellar espacios y fisuras en la construcción de la casa: unión de zócalos/sobrecimientos y muros; cornisas y otras juntas del revestimiento interno. El sello más popular es el calafateo con argamasa de yeso/cemento y, actualmente, diversos tipos de silicona y aglomerantes sintéticos.





3 PARTE

**Estrategias
recomendadas
para una vivienda
social eficiente en
Bolivia**



8

Tipologías típicas de construcción de viviendas sociales en Bolivia

Las tipologías típicas de construcción de viviendas sociales en Bolivia tienen, por zona biogeográfica, las siguientes características:

8.1 Zona 1: Tierras Bajas

La vivienda social para Tierras Bajas es una edificación compuesta por dos dormitorios, un ambiente de sala de estar y comedor, un baño y una cocina.

Elemento	Especificaciones	U [W/m²K]	SHGC	ACH
Cubierta	Placa metálica.	7,14		
	Cielo falso: placa de yeso.	5,37		
	Entretecho confinado			0
Muros	Pared de ladrillo e= 12 cm	2,44		
Piso	Contrapiso de ladrillo + cerámica	2,41		
Ventanas	Vidrio simple con marco de aluminio	5,50	0,85	
Ventilación	Renovación de aire a 50 Pa.			10

8.2 Zona 2: Tierras de Valles

La vivienda social para Tierras de Valle es una edificación de 40[m²]. Está compuesta por tres dormitorios, un hall abierto, un baño y un comedor-cocina.

Elemento	Especificaciones	U [W/m²K]	SHGC	ACH
Cubierta	Placa metálica con Zinc + cielo raso de yeso	6,00		
Muros	Pared de ladrillo e= 12 [cm] + Estuco 20 [mm]	3,00		
Piso	Contrapiso de hormigón + cerámica	2,83		
Ventanas	Vidrio simple con marco de aluminio	5,50	0,85	
Ventilación	Renovación de aire a 50 Pa			20

Zona 3: Tierras Altas

La vivienda social para Tierras Altas es una edificación de 60,6 [m²]. Está compuesta por dos dormitorios, una sala, un baño y una cocina.

Elemento	Especificaciones	U [W/m2K]	SHGC	Cantidad
Cubierta	Placa metálica + cielo raso de yeso	7,14		
Muros	Pared de ladrillo e= 12 cm	2,44		
Piso	Contrapiso de ladrillo + cerámica	2,41		
Ventanas	Vidrio simple con marco de aluminio	5,50	0,85	
Ventilación	Renovación de aire a 50 Pa			20

9 Recomendaciones generales para mejora de la eficiencia energética en viviendas sociales de Bolivia

9.1 Zona climática I: tierras bajas

Dadas las condiciones climáticas de la región de tierras bajas explicadas en secciones anteriores, las edificaciones tienden a sobre-calentarse, principalmente en el verano.

Es por esta razón que las estrategias de diseño pasivo debieran estar dirigidas a:

- Reducir la ganancia de calor generadas por la incidencia de radiación solar en cubierta, ventanas y muros. En este campo se debiera privilegiar la instalación de aleros y persianas para la protección solar; el aislamiento de muros y cubiertas.
- Aplicar ventilación nocturna en la época de verano.
- Controlar infiltraciones de aire caliente.
- Promover reducciones de calor por evaporación en el área circundante.
- Ventilar cámaras de aire en el techo y aplicar aislamiento en el lado superior del cielo falso/raso.

9.2 Zona climática II: tierras de valles

En la región de tierras de valles explicadas en secciones anteriores, las edificaciones podrían estar sometidas a importantes oscilaciones de temperatura.

Es por esta razón que las estrategias de diseño pasivo debieran estar dirigidas a:

- Reducir la transferencia de calor por conducción a través de muros, ventanas y techo, incorporando aislamiento en techo y muros, y vidrio doble hermético (DVH) en ventanas.
- Reducir el intercambio de calor provocado por filtraciones de aire.
- Aplicar estrategias de protección solar en ventanas orientadas al poniente.

9.3 Zona climática III: tierras altas

Dadas las condiciones climáticas de la región de tierras altas mencionadas en secciones anteriores, las edificaciones experimentan la pérdida de confort por frío, la mayor parte del año, principalmente en el verano.

Es por esta razón que las estrategias de diseño pasivo debieran estar dirigidas a:

- Reducir las pérdidas de calor por conducción a través de techo, muros, ventanas y piso, incorporando aislamiento en techo, muros y piso, y vidrio doble hermético (DVH) en ventanas.
- Reducir el intercambio de calor provocado por filtraciones de aire.
- Aplicar estrategias de ganancia solar en ventanas y cubierta orientadas al norte.

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and A-C Engineers. Fundamentals. 2017.

Clark II, William H. Análisis y gestión energética de edificios. McGraw-Hill. Madrid. 1998.

Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid. Guía del estándar Passivhaus. Madrid. 2011.

DOE – U.S. Department of Energy. Elements of an Energy-Efficient House. DOE/GO-10200-1070. 2000.

Guzmán, Juan Carlos. El sistema de energía. AHK/UCB/GIZ. La Paz. 2021.

HRAI – Heating, Refrigeration and Air Conditioning Institute of Canada. Residential Heat Loss and Heat Gain Calculations Manual. Ontario. 1996.

IEA – International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2017.

Jones, Peter. How to cut heating and cooling costs. New York. 1979.

Lamberts, R. Dutra, L. Pereira, F. Eficiencia energética na arquitetura. 2012.

Lechner, Norbert. Heating, cooling, lighting. Sustainable design methods for architects. New Jersey. 2015.

MINVU - Ministerio de Vivienda y Urbanismo. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional. Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. Santiago de Chile. 2009.

Queensland Government. Energy efficient home design. Queensland. 2010.

Sielfeld, Rolf. Eficiencia energética en edificios. AHK/UCB/GIZ. La Paz. 2021.

Trepp dC, Andrés. Regionalización biogeográfica de Bolivia. JUNAC/ANCB. 1986.

Trepp dC, Andrés. Ángulos y trayectorias solares en el territorio de Bolivia. ANCB. 2005.

Vale, Robert. The Autonomous House. Desing and Planning for Self-Sufficiency. Londres. 1975.

